

# **Prevención y Control del Metano en Minería Subterránea de Carbón como Oportunidad de Proyectos Sostenibles en Colombia**

**Maritza Aguilar Vélez**

Trabajo final de maestría presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Magister en Ingeniería de Recursos Minerales**

Directora:

Doctora Astrid Blandón Montes, Ph.D. en Ciencias de la Tierra opción Geología

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas  
Medellín, Colombia  
2018

## Dedicatoria

*A las mujeres de mi círculo familiar más cercano: **La Tata, Gise y mi mamá.** Gracias por el apoyo y la paciencia, por alentarme, por quererme, por mimarme y creer en mí, ustedes son el amor verdadero. **A Celeste,** el amor más grande del planeta, el ser humano más hermoso del universo, que me ha enseñado que aún en las peores crisis hay por quién levantarse y seguir.*

**A Nico Robledo, Tata Giraldo, Ana Lema**

*Hay gente que me inspira, hay gente que me motiva, hay gente que me apoya y hay gente que me reta positivamente. Ustedes cumplen con todas esas cualidades y fueron personas fundamentales en este proceso de maestría, con mucho amor para ustedes.*

## Resumen

El metano asociado al carbón ha representado grandes retos a nivel mundial en la última década, especialmente para los países donde se desarrolla la minería subterránea de carbón. Estos desafíos se presentan de varias formas: para implementar nuevos sistemas de drenaje de los gases dentro de las minas, para capturar y aprovechar estos gases en energía y/o para controlar sus emisiones en actividades de minado y prevenir accidentes. Colombia es un país con reservas de carbón importantes y con buen potencial de metano, por lo cual se vienen desarrollando conocimientos legales, ambientales, técnicos, geológicos y económicos acerca de buenas prácticas mineras, las que se deben efectuar para asegurar que los riesgos se gestionen profesional y eficientemente. El presente estudio se enfoca en los aspectos legales concernientes a la salud y seguridad en el trabajo y, en aspectos geológicos y estructurales de la minería subterránea de carbón en este país para prevenir y controlar situaciones graves que se han presentado debido a explosiones por gases. Por último, se escogen algunos indicadores sostenibles para desarrollar una metodología rápida de evaluación de aspectos prioritarios y la toma de decisiones en cuanto a riesgos dentro de una zona minera.

Palabras claves: Minería subterránea de carbón, metano, fallas inversas, prevención de accidentes, sostenibilidad en minería.

## Abstract

Coal mine methane has represented a great challenge around the world over the last decade, especially in countries with underground coal mining operations. These challenges arise in several different forms: For implementing new gas drainage systems within the mines, for capturing and using these gases for energy and/or for controlling emissions during mining activities and preventing accidents. Colombia is a country with important coal

reserves and a good potential for methane. For this reason, legal, environmental, technical, geological and financial knowledge is being developed around good mining practices that must be implemented to ensure risks are managed both professionally and efficiently. This study focuses on the legal aspects related to workplace health and safety and on the geological and structural aspects of underground coal mining in this country to prevent and control serious situations that have arisen due to gas explosions. Finally, certain sustainable indicators are chosen for developing a rapid evaluation method for priority issues and risk-related decision-making within a mining region.

Keywords: Underground coal mining, methane, reverse faults, accident prevention, mining sustainability.

## Contenido

<b>Resumen .....</b>	<b>3</b>
<b>Contenido .....</b>	<b>5</b>
<b>Lista de figuras .....</b>	<b>6</b>
<b>Lista de tablas .....</b>	<b>7</b>
<b>Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>1. Generalidades.....</b>	<b>10</b>
<b>2. Marco Referencial.....</b>	<b>17</b>
<b>3. Reglamento de Seguridad en Minería Subterránea en Colombia .....</b>	<b>29</b>
<b>4. Explosiones Asociadas a Fallas Inversas en Minas Subterráneas de Carbón .....</b>	<b>39</b>
<b>5. Esquema de Evaluación y Control de Metano en Minería Subterránea de Carbón .....</b>	<b>45</b>
<b>6. Conclusiones y Recomendaciones .....</b>	<b>56</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>58</b>

## Lista de figuras

<b><i>Figura 1 Consumo de energía primaria en el mundo, año 2015. ....</i></b>	<b><i>17</i></b>
<b><i>Figura 2 Adsorción y Absorción del gas metano en el carbón. Modificado de (Mariño, 2015). ....</i></b>	<b><i>18</i></b>
<b><i>Figura 3 Triángulo de explosividad del Metano ....</i></b>	<b><i>19</i></b>
<b><i>Figura 4 Sección Estructural Generalizada de Zonas Propensas a Explosiones ....</i></b>	<b><i>23</i></b>
<b><i>Figura 5 Evolución de la Población Mundial en el Tiempo. ....</i></b>	<b><i>25</i></b>
<b><i>Figura 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible-PNUD. ....</i></b>	<b><i>27</i></b>
<b><i>Figura 7 Sección Transversal geológica mostrando diferentes magnitudes de explosiones ....</i></b>	<b><i>41</i></b>
<b><i>Figura 8 Secciones Estructurales Mostrando Distribución de dos Bloques de una Falla Inversa ..... </i></b>	<b><i>43</i></b>

## Lista de tablas

<b>Tabla 1 Valores Límite Permisibles para algunos gases contaminantes en Colombia.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 2 Suspensión de labores por concentración máxima de metano en Colombia. ....</b>	<b>35</b>
<b><i>Tabla 3 Clasificación de minas en Colombia según contenidos de metano .....</i></b>	<b><i>35</i></b>
<b><i>Tabla 4 Peso Ponderado de Cuatro Temas o Sistemas en Esquema de Evaluación .....</i></b>	<b><i>50</i></b>
<b><i>Tabla 5 Metodología semáforo con explicación simplificada .....</i></b>	<b><i>51</i></b>
<b>Tabla 6 Indicadores de evaluación en cuatro temas y sus respectivos rangos .....</b>	<b>52</b>
<b><i>Tabla 7 Datos resumidos de la mina “La Sabrosa” .....</i></b>	<b><i>53</i></b>
<b><i>Tabla 8 Aplicación de Metodología Semáforo.....</i></b>	<b><i>53</i></b>
<b>Tabla 9 Aplicación de Metodología Semáforo y Ponderación en Mina “La Sabrosa” .....</b>	<b>54</b>
<b><i>Tabla 10 Conclusión gráfica en Mina “La Sabrosa” .....</i></b>	<b><i>55</i></b>

## Introducción

El metano en las minas de carbón (CMM en inglés), es un término dado al gas metano que se produce y/o emite en asociación con actividades de extracción de carbón ya sea del propio manto de carbón o de otras formaciones subterráneas asociadas a la secuencia carbonosa. Las grandes cantidades de metano que se liberan durante la minería, presentan preocupaciones acerca de la adecuada ventilación de la mina para garantizar la seguridad de los trabajadores y, al mismo tiempo pueden crear oportunidades para generar energía, si este es capturado y utilizado adecuadamente (C. Özgen, et al, 2010).

Como parte del cumplimiento de los requisitos para optar al grado de Magister en Ingeniería de Recursos Minerales, la autora de este documento presenta como objetivo principal, el desarrollo de una metodología de evaluación para la toma de decisiones en cuanto a prevención y mitigación de aspectos concernientes a la seguridad en las labores mineras en proyectos de minería subterránea de carbón con presencia de gas metano, enfocada en el estudio del componente geológico haciendo énfasis en la presencia de estructuras tipo fallas inversas, y en el factor regulatorio (Sistema de Gestión en Salud y Seguridad en el Trabajo), esto con el fin de que más adelante sea aplicado a uno o varios proyectos particulares en Colombia.

Para lograr lo anterior se plantearon análisis de las condiciones técnicas de índole geológica necesarias para la prevención y control de gas metano presente en la minería subterránea de carbón, haciendo énfasis en una investigación que arroja resultados interesantes acerca de la acumulación de metano en el bloque piso de fallas inversas, y la extensión de zonas propensas a las explosiones.

Además se revisaron las variables de seguridad y salud en el trabajo coligadas a los proyectos de minería subterránea de carbón en Colombia, especialmente aquellas relacionadas con reducción de las emisiones de gases y con mejoras en las condiciones de las explotaciones mineras y, también se revisó el marco legal que regula la seguridad



en las labores de minería subterránea de carbón con presencia de metano a nivel mundial. Por otro lado se dio una mirada a los avances que se han realizado en Colombia al respecto, para establecer la influencia de este componente dentro de la sostenibilidad de un proyecto seguro para sus trabajadores.

Por último, se diseña un esquema de relación de variables técnicas (geológicas) y regulatorias (seguridad de los trabajadores), involucradas en la minería de carbón con presencia de metano, que permite vincularlas entre sí asignando a cada una de ellas un peso (importancia) ponderado, que produce como resultado un conjunto de indicadores de sostenibilidad, que considera explícitamente escenarios de variabilidad temporal, y que se constituye una herramienta para la toma de decisiones en este tipo de proyectos.

# **1. Generalidades**

## **1.1 Selección y delimitación del tema**

Colombia es un país con gran potencial de recursos minero-energéticos como el petróleo y el carbón. La comercialización de éstos ocupa los primeros renglones de su economía, por tanto, se necesita efectuar buenas prácticas mineras para asegurar que los riesgos se gestionen profesional y eficientemente. Ninguna mina, incluso en los países más desarrollados, está libre de dificultades relacionadas con su actividad. No obstante, independientemente de su ubicación o de las condiciones de la extracción, es posible reducir significativamente el riesgo de accidentes de metano. La implementación de sistemas de drenaje, ventilación y captura de gases con doble propósito: reducción de la ocurrencia de futuras explosiones y aprovechamiento del metano, es una excelente alternativa en la minería subterránea de carbón, más aún si éstos están directamente relacionados con la identificación de condiciones geológico-estructurales particulares.

Desde hace varios años, un grupo de países alrededor del mundo está enfrentado a tomar decisiones sobre legislación y regulaciones referentes al control, la recuperación y uso del metano de minas de carbón (CMM, para su sigla en inglés), que van desde la propiedad de los recursos gasíferos hasta brindar alivio en las regalías por producción de energía. Varios países claves productores de carbón, tienen leyes y políticas vigentes que brindan incentivos a la recuperación y uso de CMM y que mitigan conflictos de propiedad sobre el mismo (EPA & GMI, 2014).

Entre las tareas primordiales en Colombia, está la de prevenir y controlar situaciones graves que se han presentado debido a explosiones por gases y, los retos planteados para mejorar las condiciones, parten de una evaluación que demuestre el cumplimiento de la normativa legal, ambiental y, de seguridad y salud en el trabajo. Para este trabajo se deben

## 1. Generalidades

---

introducir en Colombia, alternativas reconocidas sobre la gestión del riesgo del metano aplicadas a nivel mundial, algunas de ellas las planteadas por la Iniciativa Global del Metano.

Según el Ministerio de Minas y Energía, la demanda de energía en Colombia aumentará en los próximos años. Apoyados en algunas exploraciones público-privadas, se espera que este mercado sea alimentado por termoeléctricas y debido a las amplias reservas de carbón existentes en el país, se debe considerar el metano como un complemento y un reemplazo del gas natural durante las siguientes décadas, especialmente ahora cuando se ha encontrado que las reservas de gas convencional no son tan significativas como se había pensado (UPME, 2016).

En cuanto a políticas de aprovechamiento y control del gas metano relacionado con yacimientos de carbón, Colombia es un país que se encuentra en la tarea de avanzar en el conocimiento sobre temas de gases no convencionales y para ello, vienen trabajando en conjunto varias entidades. En un breve repaso por la legislación colombiana se sabe que, en cuanto a hidrocarburos y gases convencionales éstos son estudiados, evaluados, promovidos, administrados y controlados por la ANH (Agencia Nacional de Hidrocarburos), mientras que la entidad encargada de las mismas funciones para el carbón es la ANM (Agencia Nacional de Minería). Ambas entidades se encuentran bajo el amparo del Ministerio de Minas y Energía, sin embargo cuando se trata de Gas Asociado al Carbón, ninguna de las dos entidades tiene plenas facultades sobre la legislación, regulación o promoción de este recurso no convencional. En cuanto a otros aspectos, tales como el técnico, económico o ambiental, se ha venido trabajando en investigación a través de entidades académicas, privadas y estatales.

La UPME (Unidad de Planeamiento Minero Energética) desde un poco antes de 2015, viene adelantando algunos estudios sobre CBM/CMM (Coal Bed Methane/Coal Mine Methane), que sirven de base para conclusiones en aspectos relevantes en las cuencas carboníferas de Colombia, sin embargo falta camino por recorrer para poner en marcha un proyecto piloto que aporte conclusiones tangibles sobre la sostenibilidad legal, técnica, económica y ambiental de este recurso en Colombia.

## 1.2 Planteamiento del Problema

### • Antecedentes

El carbón ha sido una importante fuente de producción de energía primaria a nivel mundial durante los últimos dos siglos. El metano ( $\text{CH}_4$ ) que se libera durante el proceso de extracción del carbón crea condiciones inseguras de trabajo en muchas minas subterráneas de todo el mundo, con víctimas humanas mortales como consecuencia inaceptable de muchos accidentes relacionados con este gas. La gestión eficaz del recurso gasífero no se limita a cuestiones de seguridad, ya que el metano liberado a la atmósfera, especialmente desde sistemas de drenaje, es un recurso energético que se pierde para siempre y las emisiones resultantes contribuyen al cambio climático.

Existen otras variables a tener en cuenta tanto a nivel técnico como legal y comercial que contribuyen positiva y/o negativamente con el aprovechamiento de este recurso, no obstante el conocimiento es fundamental para lograr cero fatalidades y riesgo de explosión, mientras se reduce al mínimo el impacto ambiental de las emisiones de metano y se aprovecha para tomar decisiones con una base sólida de entendimiento, desde la cual se pueden dirigir políticas y decisiones adecuadas.

Aunque la literatura técnica respetada en relación con la gestión del metano está disponible para los profesionales de la minería a nivel mundial, en Colombia hace pocos años se vienen adelantando estudios relacionados con el tema y aún se dificulta consultar bibliografía al respecto. Empresas del sector público y privado, tales como La Empresa Colombiana del Petróleo (Ecopetrol), Drummond, Cerrejón, La Empresa Generadora y Comercializadora de Energía del Caribe (GECELCA), La Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), La Unidad de Planeamiento Minero Energético (UPME), La Agencia Nacional de Minería (ANM), el Ministerio de Minas y Energía, El Servicio Geológico Colombiano (SGC) y algunas universidades (Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia UPTC, Universidad Nacional de Colombia sedes Medellín y Bogotá, La Universidad Industrial de Santander, La Universidad EAFIT), han estado trabajando en diferentes proyectos relacionados con temas del gas asociado al carbón en diferentes cuencas colombianas, algunos documentos se encuentran disponibles y otros son de

## 1. Generalidades

---

carácter reservado.

A nivel mundial, las entidades más reconocidas y que trabajan en pro del conocimiento para el gas asociado al carbón son:

La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) es una de las cinco Comisiones Regionales de la ONU y facilita un foro a través del cual 56 países de América del Norte, Europa Occidental, Central y Europa del Este, así como Asia Central, se reúnen para forjar las herramientas de su cooperación económica. Las principales áreas de actividad de la UNECE son: La cooperación económica, medio ambiente, asentamientos humanos, estadísticas, energía sostenible, comercio, industria, desarrollo empresarial, madera, y transporte. La UNECE busca sus objetivos a través del análisis de políticas, el desarrollo de los convenios, reglas y normas, y la prestación de asistencia técnica.  
[www.unece.org/energy/se/cmm.html](http://www.unece.org/energy/se/cmm.html)

La Asociación del Metano para Mercados (M2M) es una asociación público-privada internacional con 30 países socios, además de la Comisión Europea creada en 2004, y se centró en promover la reducción costo-efectividad de las emisiones de metano, mediante su recuperación y utilización desde cuatro sectores clave del metano: la minería del carbón, rellenos sanitarios, sistemas de gas y petróleo, y agricultura. El Subcomité de Carbón ha reunido a expertos clave en la recuperación del metano de las minas de carbón y su utilización para compartir información acerca de las tecnologías de punta y las prácticas a través de una serie de talleres, cursos de formación, etc. [www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org)

La Iniciativa Global del Metano (GMI, en inglés) lanzada en el 2004, es una alianza voluntaria multilateral que busca reducir las emisiones globales de metano en las cinco principales fuentes de emisión, incluyendo las minas de carbón. La GMI trabaja para promover la reducción, recuperación y uso del metano como una fuente de energía limpia, creando una red internacional de gobiernos asociados, miembros del sector privado, bancos de desarrollo, universidades y organizaciones no-gubernamentales para así construir capacidades, desarrollar estrategias, mercados, y remover barreras para el desarrollo de proyectos para la reducción de metano en los países Asociados.  
[www.globalmethane.org](http://www.globalmethane.org)

En todo caso, se debe seguir adelantando en el conocimiento sobre este tema y buscar la aplicabilidad de proyectos de aprovechamiento y beneficio de CBM/CMM en Colombia.

- **Descripción del problema**

Las explosiones instantáneas en minas de carbón implican la expulsión catastrófica y contundente de grandes cantidades de gas, creando un riesgo minero. El gas de estas explosiones consiste principalmente de metano, el cual ha creado un peligro importante que afecta la seguridad y la productividad en las minas de carbón subterráneas durante más de 100 años. Las mezclas de metano-aire, se pueden encender por una serie de fuentes tales como: chispas eléctricas, compresión adiabática, por caídas de roca, explosivos y detonadores, operaciones con maquinaria, entre otras.

Las investigaciones de las explosiones de gas de carbón durante el siglo pasado tenían como objetivo predecir y prevenir daños en las minas. Durante este tiempo, las emisiones de gases se diluyeron con los sistemas de ventilación tales como túneles, pozos de perforación verticales y horizontales, y pozos de drenaje. La "crisis energética" de los años 70 condujo a estudios sobre la viabilidad de producir el gas para uso comercial. Desde la década de 1970, las investigaciones sobre las causas y los efectos de las explosiones de las minas de carbón y las emisiones de gases han conducido a importantes avances hacia la recuperación y desarrollo de metano de las minas de carbón para uso comercial (R. Flores, 1997).

Por otro lado, otros investigadores han estudiado las relaciones entre las explosiones de carbón y muchos factores geológicos tales como el espesor, la edad, la profundidad de enterramiento actual y la distancia a los plutones de los mantos de carbón, con conclusiones diferentes para distintos campos de carbón y regiones, debido a la complejidad de los mecanismos causales.

En el contexto Colombiano de la minería subterránea de carbón, se tienen distritos carboníferos que se deben tener en cuenta y mejorar las condiciones a todos los niveles. En cuanto a este trabajo, se relacionarán variables de índole geológico-estructural p.e. fallas inversas y sistemas de sinclinales-anticlinales, y variables de seguridad e higiene en el trabajo bajo criterios de índices compuestos.

### 1.3 Justificación

En el estudio de alternativas energéticas, se ha encontrado diferentes posiciones frente al control y la utilización del metano en la minería de carbón (CMM), considerando que el metano es un gas de efecto invernadero 25 veces más potente que el dióxido de carbono (IPCC, 2007). El metano es emitido durante la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo. Las emisiones de gases también resultan de la ganadería y otras prácticas agrícolas y de la descomposición del desperdicio orgánico en los vertederos de desechos sólidos municipales y de ciertos sistemas de tratamiento de aguas de desecho (Global Methane Initiative, 2016).

A diferencia de otros gases de efecto invernadero, el metano es el componente principal del gas natural y se puede convertir en energía utilizable. Por consiguiente, la reducción de emisiones de metano de las minas de carbón sirve como un método efectivo en costos para reducir los gases de efecto invernadero y para aumentar la seguridad energética, incentivar el crecimiento económico, mejorar la calidad del aire y la seguridad de los trabajadores (EPA & GMI, 2014).

Países como China, Australia, India, Estados Unidos, entre otros, han avanzado significativamente en la puesta en marcha de proyectos de este tipo con aportes demostrables. Por su parte Colombia es el país con mayor potencial en América Latina en materia de gas metano asociado al carbón, según Global Methane Initiative (2015), lo que significa que se deben adelantar estudios que definan las estrategias en todos los aspectos para el control y aprovechamiento de este recurso no convencional.

El gas metano asociado al carbón se considera como un residuo peligroso en la industria de extracción minera subterránea de carbón, sin embargo, posee un alto potencial para el suministro de energía limpia y abundante que podría ayudar a reemplazar otras reservas de hidrocarburos en declive como es el caso del gas natural y los combustibles líquidos. Además su control puede reducir de manera significativa la seguridad en el trabajo de los mineros.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Desarrollar una metodología de evaluación para la toma de decisiones en cuanto a prevención y mitigación de aspectos concernientes a la seguridad en las labores mineras en proyectos de minería subterránea de carbón con presencia de gas metano, enfocada en el estudio del componente geológico haciendo énfasis en la presencia de estructuras tipo fallas inversas, y en el factor regulatorio (Sistema de Gestión en Salud y Seguridad en el Trabajo).

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

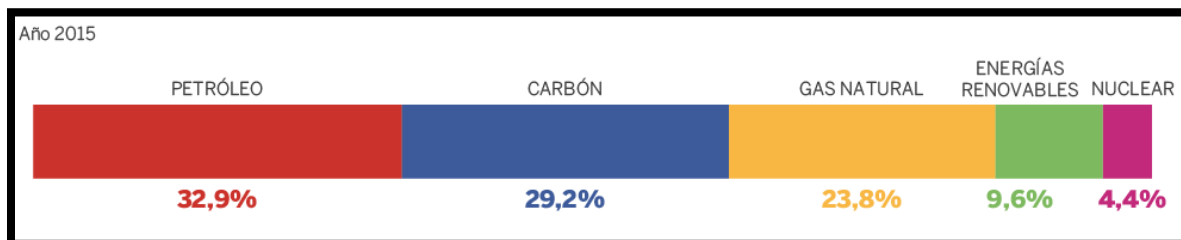
- Analizar las condiciones técnicas de índole geológica necesarias para la prevención y control de gas metano presente en la minería subterránea de carbón, tales como características geológicas de la cuenca, especialmente geología estructural y sus implicaciones en la fuga y/o captura de emisiones de gases, calidad del carbón, aprovechamiento de los recursos carboníferos, entre otras.
- Estudiar las variables de seguridad y salud en el trabajo coligadas a los proyectos de minería subterránea de carbón, especialmente aquellas relacionadas con reducción de las emisiones de gases y con mejoras en las condiciones de las explotaciones mineras.
- Revisar el marco legal que regula la seguridad en las labores de minería subterránea de carbón con presencia de metano a nivel mundial, y los avances que se han realizado en Colombia al respecto, para establecer la influencia de este componente dentro de la sostenibilidad de un proyecto seguro para sus trabajadores.
- Diseñar un esquema de relación de las variables técnicas (geológicas) y regulatorias (seguridad de los trabajadores), involucradas en la minería de carbón con presencia de metano, que permita vincularlas entre sí, asignando a cada una de ellas un peso (importancia) ponderado, que produzca como resultado un conjunto de indicadores de sostenibilidad específicos y globales, que considere explícitamente escenarios de variabilidad temporal, y que se constituya en una herramienta para la toma de decisiones en este tipo de proyectos.



## 2.Marco Referencial

### 2.1 Marco Teórico [3] [5] [20] [24]

El mundo se ha apoyado en el carbón para una parte significativa de su producción de energía primaria desde la Revolución Industrial, Figura 1. Los principales países industrializados, las economías emergentes y en transición del mundo, y por lo tanto la economía mundial dependen en gran medida de los recursos de energía del carbón. El carbón suministra el 25% de la energía primaria global, el 40% de la electricidad mundial, y casi el 70% de la industria del acero y del aluminio del mundo.

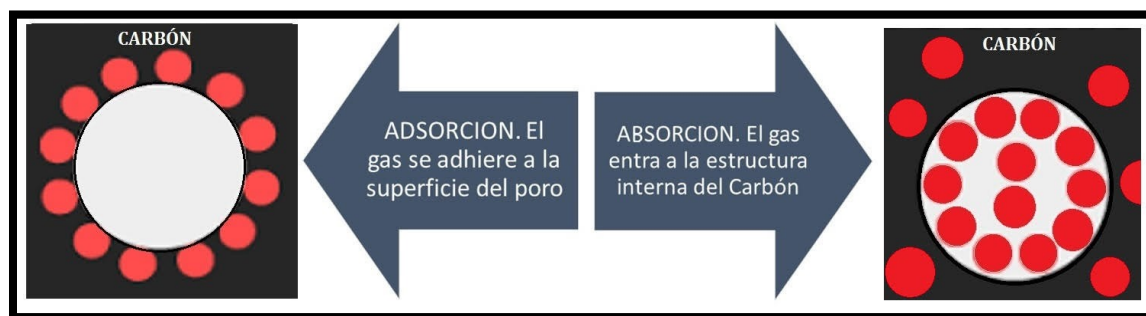


**Figura 1 Consumo de energía primaria en el mundo, año 2015. Tomado de [https://elpais.com/elpais/2016/10/07/media/1475860979\\_972896.html](https://elpais.com/elpais/2016/10/07/media/1475860979_972896.html)**

La carbonificación es el proceso de transformación gradual del contenido de carbono de la materia orgánica fósil en el curso de un proceso natural. El material vegetal a una profundidad suficiente y durante un período de tiempo determinado, evoluciona hasta que tiene lugar el carbón. Cuanto mayor sea la temperatura, la presión y la duración de enterramiento del carbón, mayor es su madurez (rango), y mayor es la cantidad de gas que puede producir. El carbón puede generar y atrapar su propio gas, es al mismo tiempo fuente y reservorio de metano ( $\text{CH}_4$ ). El metano se forma en el carbón como resultado de las reacciones químicas que tienen lugar cuando la materia orgánica es enterrada en profundidad. A medida que el carbón aumenta de rango, se acentúa su aromaticidad, y por

lo tanto puede intensificarse su microporosidad y su área de superficie interna, lo cual es óptimo para la retención del metano.

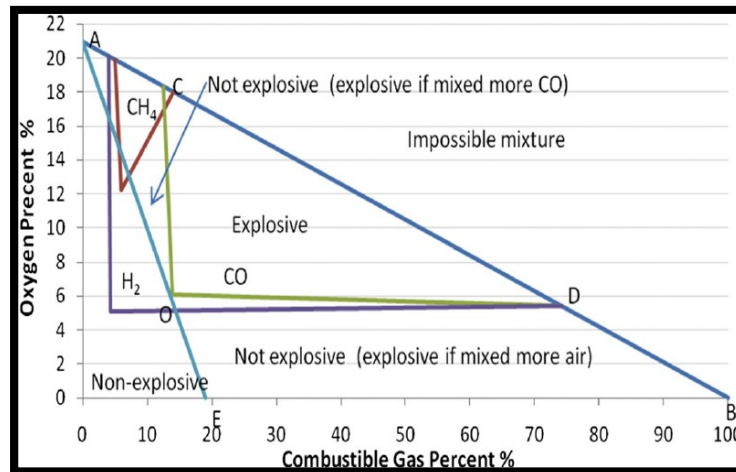
*“La mayor parte del gas que se encuentra en el interior del carbón está almacenado por absorción en la matriz del mismo, comprimido en una capa monomolecular en estado semilíquido. El restante se encuentra como gas libre en el sistema de fracturas (cleats) y poros (primarios y secundarios) del carbón y como gas disuelto dentro del agua de formación. Gracias a que el carbón tiene la propiedad de poseer un área superficial interna bastante extensa y que las moléculas de gas pueden estar de forma compacta en la capa monomolecular, el carbón tiene la capacidad de retener grandes cantidades de metano en su interior” (Mariño, 2015), figura 2.*



**Figura 2 Adsorción y Absorción del gas metano en el carbón. Modificado de (Mariño, 2015).**

El metano es un gas explosivo en el rango del 5% al 15% del metano en el aire. Su transporte, recolección, o uso dentro de este rango o incluso dentro de un factor de seguridad de por lo menos 2,5 veces el límite inferior de explosividad y al menos dos veces el límite superior, se considera generalmente inaceptable debido a los riesgos de explosión inherentes. En la figura 3 se muestra el triángulo de explosividad Coward and Jones, 1952 que ilustra lo explicado.

## 2. Marco Referencial



**Figura 3 Triángulo de explosividad del metano de Coward and Jones, 1952 Tomado de [https://www.researchgate.net/figure/Coward-explosive-triangles-for-methane-carbon-monoxide-and-hydrogen\\_fig7\\_257390835](https://www.researchgate.net/figure/Coward-explosive-triangles-for-methane-carbon-monoxide-and-hydrogen_fig7_257390835)**

El CMM (Coal Mine Methane), plantea desafíos a la seguridad y al medio ambiente. La industria del carbón mundial, los gobiernos, los sindicatos y los defensores de la seguridad del trabajador están preocupados por la frecuencia y gravedad de las explosiones del metano, especialmente en las economías emergentes, donde son inaceptablemente altas. Las buenas prácticas mineras necesitan ser transferidas a todos los países para asegurar que los riesgos se gestionen profesional y eficientemente.

La gestión eficaz de los riesgos de metano en minas de carbón, también puede tener la ventaja de contribuir a la reducción o minimización de las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG). Las minas de carbón son una fuente importante de emisiones de metano, un potente GHG con un potencial de calentamiento global (GWP) de 20 veces más que el del dióxido de carbono (IPCC, 2007). El metano totaliza 14% del antropogénico global de las emisiones de gases de efecto invernadero y las minas de carbón liberan 6% de las emisiones antropogénicas mundiales de metano, unos 400 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (MtCO<sub>2</sub>e), por año.

### **2.1.1 Ocurrencia de Metano y Control**

Los gases ricos en metano, por lo general contienen de 80% a 95% de metano en las profundidades de la minería subterránea, se encuentran naturalmente en los mantos de carbón y se liberan como CMM cuando los mantos son perturbados por las actividades mineras. El CMM sólo se vuelve inflamable y crea un riesgo de explosión cuando se le permite mezclarse con el aire.

Las emisiones de grandes cantidades de dióxido de carbono también se producen a partir de las minas de carbón en algunos ambientes geológicos (p.e., Australia, Sudáfrica, Francia, y Europa Central). Este dióxido de carbono del manto de carbón puede tener implicaciones importantes para las estrategias de gestión de la desgasificación de las minas en general.

Las buenas prácticas de seguridad en las minas de carbón reducen el riesgo de explosión mediante la prevención de ocurrencia de mezclas explosivas, diluyendo rápidamente a concentraciones seguras (p.e. a través de los sistemas de ventilación). Cuando los flujos de gas son tan altos que superan la capacidad del sistema de ventilación de la mina, para asegurar una dilución adecuada de metano en el aire de la mina, el gas se debe recoger a través de un sistema de drenaje antes de que pueda entrar en los conductos de ventilación de la mina. Con un buen sistema, el CMM se puede atrapar de manera segura, transportar y, (si es apropiado) utilizar a una concentración, al menos dos veces la del límite explosivo superior (p.e. en o sobre el 30% de metano).

### **2.1.2 Liberaciones Subterráneas de Metano**

Los flujos de gas en minas subterráneas de carbón, bajo condiciones normales de estado estable, son relativamente predecibles en ciertas condiciones geológicas y mineras, aunque existe una variación significativa de una cuenca a otra. La falta de métodos de predicción de las emisiones de gas, confiables para la minería profunda y minería de múltiples mantos, sigue siendo un reto significativo, debido a las complejas interacciones causadas por el minado entre los estratos, las aguas subterráneas y el gas. No obstante, los métodos de eficacia comprobada para la proyección de los flujos de gas, captura de

gas, los requisitos de ventilación y el potencial de utilización, se deben usar de manera rutinaria en la planificación minera.

Por su propia naturaleza, la emisión inusual y las explosiones de metano, no son fáciles de predecir, pero las condiciones en las que pueden ocurrir son razonablemente conocidas. Por lo tanto, seguir las buenas prácticas permite una gestión más eficaz de estos riesgos.

### **2.1.3 Drenaje del Metano**

El objetivo de drenar el metano es capturar gas de alta pureza a partir de su fuente antes de que pueda entrar en los ductos de ventilación de las minas. Desde un punto de vista estrictamente reglamentario, sólo es necesario capturar la cantidad de gas para garantizar que la capacidad del aire de ventilación para diluir los contaminantes gaseosos, no se exceda. Sin embargo, hay sólidos argumentos para maximizar la captura de gas, a fin de lograr una mayor seguridad, la mitigación del impacto medio ambiental y la recuperación de energía.

El metano se puede capturar antes y después del minado, mediante técnicas de pre y postdrenaje respectivamente. El predrenaje es el único medio de reducción del flujo de gas directamente desde el manto explotado, por esta razón el predrenaje es especialmente importante si el manto que se extrae es la fuente principal de emisión de gases.

Los métodos de postdrenaje involucran la interceptación del metano liberado por la perturbación del minado antes de que pueda entrar en un ducto de ventilación de la mina. Todas las técnicas de postdrenaje implican el acceso a la zona de perturbación por encima (y a veces también por debajo) de la capa de carbón trabajado. El postdrenaje puede implicar la perforación de la superficie o del subsuelo.

Desde la perspectiva del negocio, hay fuertes argumentos para la instalación y operación de sistemas de drenaje de gas metano de alta eficiencia. El control eficiente de metano es un factor clave en el logro de la rentabilidad de las minas subterráneas de carbón con altas reservas gaseosas.

Sobre la base de las experiencias en minas de carbón de todo el mundo, la inversión en "buenas prácticas" de los sistemas de drenaje de gas, redundan en menores tiempos de inactividad debido a problemas de emisión de gases, en entornos mineros más seguros y en oportunidades para mayores usos del gas, reduciendo las emisiones

#### **2.1.4 Geología Estructural en Cuencas Carboníferas con Metano**

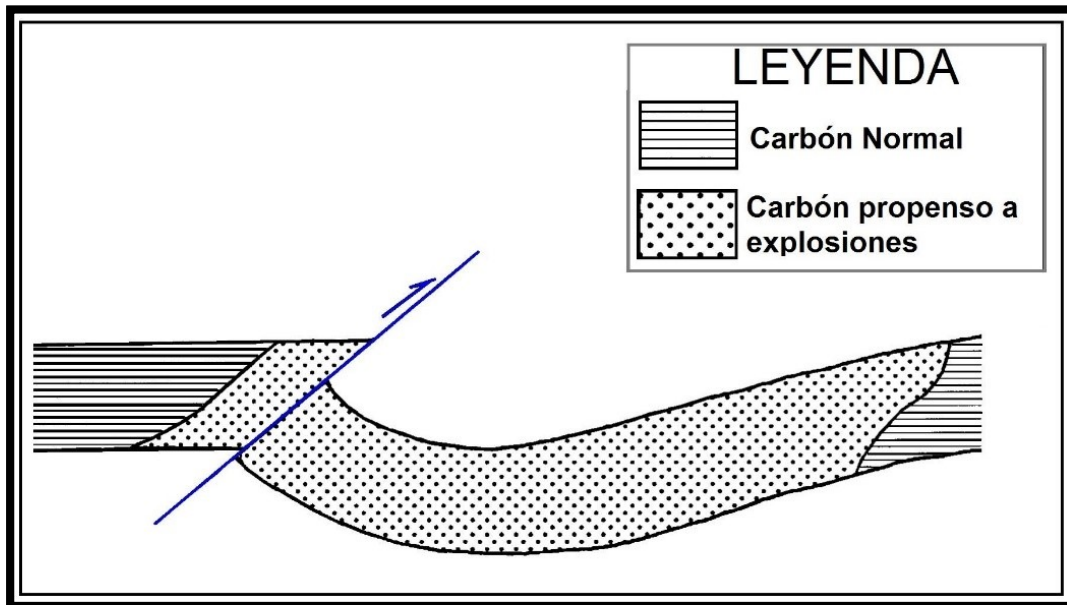
Tomarse el tiempo para comprender el marco geológico de un yacimiento de carbón con contenidos de metano, es uno de los aspectos clave en proyectos de minería subterránea de este material. Las explosiones instantáneas en las minas de carbón implican una expulsión catastrófica de grandes cantidades de gas del carbón, lo que crea un gran peligro para la minería y sus trabajadores. Algunos autores han estudiado las relaciones entre las explosiones en la minería de carbón y muchos factores geológicos, tales como el espesor, el rango, la edad, la profundidad de enterramiento actual y la influencia de estructuras geológicas como fallas.

Las emisiones anormales e imprevistas de gases en las minas en cantidades suficientes para crear condiciones peligrosas, a menudo se han atribuido a diversas características geológicas. Por ejemplo, las estructuras geológicas tales como las fallas han sido reconocidas durante mucho tiempo como canales para el flujo de gas desde los estratos adyacentes a los estratos de carbón minados. Otras características como la presencia de areniscas, paleocanales, capas de arcilla, cambios de facies, de permeabilidad y tipos de carbón, plegamiento y cizallamiento localizados del manto de carbón, también han sido ampliamente reconocidas por sus impactos en las emisiones de gases en el trabajo de la mina. Durante la diagénesis y el enterramiento de la materia orgánica que finalmente forma mantos de carbón explotables, la materia orgánica que se encuentra dispersa en los estratos adyacentes puede producir metano en cantidades que exceden con creces el almacenamiento y capacidad del carbón y la roca circundante. Como resultado, grandes cantidades de metano pueden quedar atrapadas en estos estratos. El flujo de este gas a altas velocidades en el funcionamiento de la mina puede verse facilitado o impedido temporalmente por la presencia de estructuras geológicas o anomalías durante la extracción de los mantos de carbón cercanos. Los eventos de emisión que a menudo se asocian distintivamente con las características geológicas de escala variable son ocasionalmente inmediatos y catastróficos; sin embargo, con mayor frecuencia, estas

## 2. Marco Referencial

emisiones son más sutiles y no se detectan fácilmente sin reconocimiento e instrumentación de campo. (Karacan, Ruiz, Cote, Phipps, 2011).

En el desarrollo de este documento, se hará énfasis en la relación de las acumulaciones de metano con la influencia de estructuras tipo fallas. Y. Cao et al., (2001), consideraron en estudios previos que *“la deformación tectónica y las deformaciones asociadas a microestructuras del carbón, son factores importantes que influyen en la ocurrencia de explosiones”*. Otros autores encontraron que las explosiones sólo se producen en distritos sujetos a movimiento tectónico severo y en asociación con dicha deformación y estructuras depositacionales como pliegues, fallas, cabalgamientos y deslizamientos, y en particular con rápidas fluctuaciones en el espesor de los mantos de carbón. Shepherd, et al., (1981), informaron sobre la incidencia de explosiones en Australia, América del Norte, Europa y Asia, y encontraron que probablemente más del 90% de las explosiones significativas se concentraron cerca de zonas fuertemente deformadas a lo largo de los ejes de estructuras tales como anticlinales, zonas de charnela de pliegues de arrastre y zonas intensamente deformadas de fallas con deslizamiento, empuje, retroceso y fallas normales. En la figura.4 se muestra una sección generalizada de zonas propensas a explosiones en una falla inversa.



**Figura 4 Sección estructural generalizada, mostrando zonas propensas a explosiones en los dos bloques de una falla inversa. Modificado de [5]**

### **2.1.5 Costos y Economía del Metano**

Un drenaje eficaz de gas reduce los riesgos de explosiones y por consiguiente, los riesgos de accidentes. La reducción de estos riesgos reduce a su vez sus costos asociados. Los costos de los accidentes relacionados con metano varían mucho de país a país pero son significativos.

El drenaje de gas crea una oportunidad para la recuperación del gas y su respectiva utilización. Estos proyectos de recuperación de energía pueden ser económicos per se, por medio de la venta del gas o su conversión a electricidad, combustible para vehículos u otras formas valiosas de inserción en ductos o de almacenamiento.

Los proyectos de recuperación y utilización del gas, son administrados cada vez más como fuentes de ingresos adicionales en la forma de créditos de reducción de emisiones de carbono, como: Reducciones de Emisiones Verificadas (VERs), Reducciones de Emisiones Certificadas (CERs) u otros créditos como las Unidades de Reducción de Emisiones (URE). Estas opciones potenciales de financiamiento de carbono, pueden ser un factor crítico en hacer que algunos de los proyectos de utilización de CMM, que de otro modo serían poco atractivas, sean económicamente viables.

Actualmente, las decisiones de inversión en la mayoría de las minas son propensas a favorecer la expansión de la producción de carbón, en lugar de desarrollar proyectos de utilización del CMM (en particular la generación de energía), esto debido al alto costo de oportunidad de la inversión en bienes de equipos e infraestructura de generación de energía. Sin embargo, a fin de cumplir con los objetivos de protección del medio ambiente en el futuro podría requerirse que los propietarios de las minas, puedan mejorar la capacidad de drenaje del gas más allá del nivel estrictamente necesario, para satisfacer las necesidades de seguridad de las minas. Tales mejoras en el sistema de drenaje, que producen relativamente gas de alta calidad, pueden proporcionar un incentivo adicional para la inversión en proyectos de recuperación y de utilización de gas.

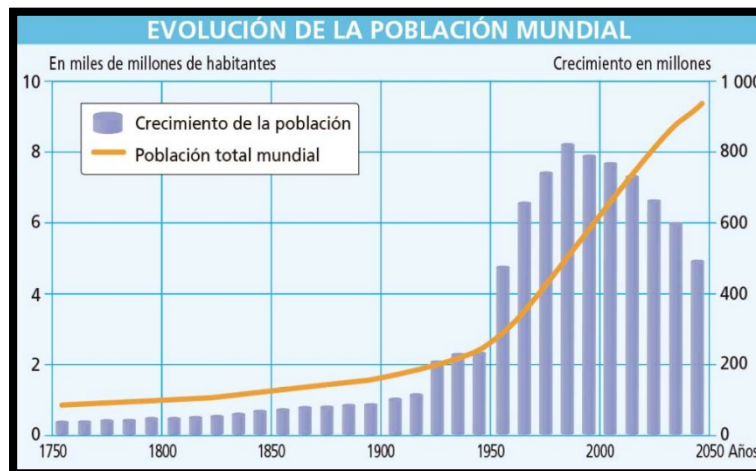


## 2.2 Marco Conceptual-Disciplinar

### 2.2.1 Sostenibilidad [28]

¿Qué significa “desarrollo sostenible” en general y específicamente para la industria minera? En este marco conceptual se iniciará abordando las definiciones de Naciones Unidas:

Se define «el desarrollo sostenible como la satisfacción de «las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades». (Informe titulado «Nuestro futuro común» de 1987, Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo), el desarrollo sostenible ha emergido como el principio rector para el desarrollo mundial a largo plazo. Consta de tres pilares, el desarrollo sostenible trata de lograr de manera equilibrada, el desarrollo económico, el desarrollo social y la protección del medio ambiente. La Figura 5 muestra la evolución de la población mundial en el tiempo.



**Figura 5 Evolución de la población mundial en el tiempo. . Tomado de**  
<https://www.blinklearning.com/coursePlayer/clases2.php?idclase=52662649&idcurso=951859>

En 1992, la comunidad internacional se reunió en Río de Janeiro, Brasil, para discutir los medios para poner en práctica el desarrollo sostenible. Durante la denominada Cumbre de la Tierra de Río, los líderes mundiales adoptaron el Programa 21, con planes de acción

específicos para lograr el desarrollo sostenible en los planos nacional, regional e internacional. Esto fue seguido en 2002 por la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible, en donde se aprobó el Plan de Aplicación de Johannesburgo. El Plan de Aplicación se basó en los progresos realizados y las lecciones aprendidas desde la Cumbre de la Tierra, y prevé un enfoque más específico, con medidas concretas y metas cuantificables y con plazos definidos.

En 2012, veinte años después de la histórica Cumbre de la Tierra, los líderes mundiales se reunieron de nuevo en Río de Janeiro a:

- Asegurar el compromiso político renovado con el desarrollo sostenible
- Evaluar el progreso y su aplicación eficiente en el cumplimiento de los compromisos ya acordados, y
- Abordar los desafíos nuevos y emergentes.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible o Cumbre de la Tierra de Río 2020, se centrará en dos temas:

- Economía verde en el contexto del desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza
- El marco institucional para el desarrollo sostenible.

Economía verde: La que resulta en un mejor bienestar humano y equidad social, a la vez que reduce significativamente los riesgos ambientales y la escasez ecológica. Es bajo en carbono, eficiente en el uso de los recursos y socialmente inclusivo. En una economía verde, el crecimiento de los ingresos y el empleo debería ser impulsado por inversiones públicas y privadas que reduzcan las emisiones de carbono y la contaminación, mejoren la eficiencia energética y de los recursos, y prevengan la pérdida de biodiversidad y servicios ecosistémicos (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente-PNUMA, 2011).

## 2. Marco Referencial

### ¿QUÉ SON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE? (PNUD 2015)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), también conocidos como Objetivos Mundiales, son un llamado universal a la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. Ver figura 6



**Figura 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo-PNUD).** Tomado de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

¿Por qué se incluye la minería en el esquema de Desarrollo Sostenible?

Directrices de Berlín II (2002, revisadas)-Mesa Redonda Internacional para Minería y Medio ambiente 1991, Berlín : *"Si el desarrollo sostenible se define como la integración de los aspectos sociales, económicos y ambientales, luego un proyecto minero que es desarrollado, operado y cerrado en una manera ambiental y socialmente aceptable, podría verse como una contribución al desarrollo sostenible. Es fundamental para este objetivo asegurar que los beneficios del proyecto se emplean para desarrollar una región de una manera que va a sobrevivir mucho después de que la mina ha cerrado."*

El futuro que queremos (2012, párrafo 227-228)

*"227. Reconocemos que los minerales y metales hacen una gran contribución a la economía mundial y las sociedades modernas. Observamos que las industrias mineras son importantes para todos los países con recursos minerales, en particular los países en*

*desarrollo. También observamos que la minería ofrece la oportunidad de catalizar un desarrollo económico de amplia base, reducir la pobreza y ayudar a los países a cumplir los objetivos de desarrollo acordados internacionalmente, incluidos los Objetivos de Desarrollo del Milenio, cuando se manejan de manera efectiva y adecuada. Reconocemos que los países tienen el derecho soberano de desarrollar sus recursos minerales de acuerdo con sus prioridades nacionales y la responsabilidad con respecto a la explotación de los recursos descritos en los Principios de Río. Además, reconocemos que las actividades mineras deben maximizar los beneficios sociales y económicos, así como abordar de manera efectiva los impactos ambientales y sociales negativos. En este sentido, reconocemos que los gobiernos necesitan capacidades sólidas para desarrollar, gestionar y regular sus industrias mineras, en interés del desarrollo sostenible.*

*228. Reconocemos la importancia de un marco legal y regulatorio fuerte y efectivo, políticas y prácticas para el sector de la minería que ofrecen beneficios económicos y sociales e incluyen salvaguardias efectivas que reducen los problemas sociales e impactos ambientales, así como conservar la biodiversidad y los ecosistemas, incluso durante el cierre posterior a la explotación minera. Pedimos a los gobiernos y las empresas que promuevan la mejora continua de la responsabilidad y la transparencia, así como la eficacia de los mecanismos existentes relevantes para prevenir los flujos financieros ilícitos de las actividades mineras".*

## **3.Reglamento de Seguridad en Minería Subterránea en Colombia**

Una aproximación en la evaluación para minimizar los riesgos de explosión, combinados con una fuerte aplicación de una ventilación robusta y la utilización de reglamentos de seguridad, puede llevar a mejorar sustancialmente las cantidades del gas fugado y/o capturado.

El establecimiento y la aplicación de las normas de seguridad que regulan la extracción de gas, el transporte y su utilización, fomentará estándares más altos para el drenaje del metano, aumentando la producción de energía limpia y mayores reducciones de emisiones, esto aún no se aplica en Colombia pero ya se está haciendo una conciencia al respecto.

En la actualidad, algunos países alrededor del mundo tienen un alto interés de conocer, y tomar decisiones sobre legislación y regulaciones referentes a la recuperación y uso del metano de minas de carbón, que van desde la propiedad de los recursos gasíferos hasta brindar alivio en las regalías por producción de energía.

Varios países claves productores de carbón tienen leyes y políticas vigentes que brindan incentivos a la recuperación y uso de CMM y que mitigan conflictos de propiedad sobre el mismo; sin embargo, algunas de dichas políticas son más efectivas que otras. Se deben considerar problemas o proyectos específicos, para presentar consideraciones y opciones para el desarrollo de leyes y políticas que eviten conflictos de propiedad, mitiguen los riesgos legales percibidos para los desarrolladores de proyectos y estimulen el uso de CMM.

En Colombia, como resultado de la articulación interinstitucional adelantada por el Ministerio del Trabajo, el Ministerio de Salud y Protección Social, la Agencia Nacional de Minería y el Ministerio de Minas y Energía, entidades que conforman la “Mesa de Revisión de los Reglamentos de Seguridad”, se expidió el Decreto 1886, “Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas”. (21 de septiembre de 2015, Ministerio de Minas y Energía), como respuesta a la petición que establecía: “Se hace necesario actualizar el Reglamento de Seguridad en las Labores Subterráneas, expedido mediante el Decreto 1335 de 1987 en razón a que desde esa fecha y hasta hoy, la ciencia y la tecnología han avanzado tanto en las técnicas de explotación de labores subterráneas como en las de control de riesgos en el trabajo”.

En dicho Reglamento se encuentran los nuevos aspectos en seguridad minera y seguridad y salud en el trabajo, que deben tener en cuenta los titulares de derechos mineros, explotadores y empleadores mineros en las labores diarias que adelanten a través de minería subterráneas, se asignan responsabilidades de la aplicación y cumplimiento del mismo, haciendo solidarios a los actores mencionados anteriormente y, lo que en la práctica los involucra judicialmente en procesos legales que se efectúen por y como consecuencia de accidentes de trabajo que se lleguen a presentar en la ejecución de las labores mineras contratadas.

Igualmente, el artículo 97 de la Ley 685 de 2001 establece que “En la construcción de las obras y en la ejecución de los trabajos de explotación, se deberán adoptar y mantener las medidas y disponer del personal y de los medios materiales necesarios para preservar la vida e integridad de las personas vinculadas a la empresa y eventualmente de terceros, de conformidad con las normas vigentes sobre seguridad, higiene y salud ocupacional”.

Como se ha mencionado antes, todavía falta un buen camino por recorrer en cuanto a establecer normativas acerca de aspectos legales, ambientales y de seguridad que se refieran a la presencia y aprovechamiento de metano en labores mineras subterráneas, sin embargo ya se están dando avances y algunos aspectos están reglamentados por el Decreto No 1886 de 2015, donde por primera vez se define, en un decreto el tema de drenaje de gas metano de la siguiente manera: *“Se refiere a las técnicas de extracción de gas metano, antes y durante la explotación minera de carbón subterráneo, las cuales*

*pueden incluir perforaciones desde superficie antes del inicio de labores mineras y durante la explotación del mineral, el drenaje previo busca reducir el flujo de gas metano directamente del manto de carbón a ser explotado; mientras que, durante la explotación minera el objetivo de dicho drenaje es la captura de gas metano presente en los frentes de explotación sin ser diluido aún, evitando su acumulación para reducir riesgos operativos”.*

A continuación se mencionarán algunos artículos y párrafos de este decreto, con el fin de plantear más adelante los indicadores ponderados con base en ello: [11]

En capítulo IV, Artículo 23, Párrafo 3. Dice: *“El titular del derecho minero, el explotador minero y el empleador minero deben contar con un servicio de seguridad el cual tiene la responsabilidad de implementar un programa permanente de entrenamiento de personal en el manejo y mantenimiento de equipos de protección para garantizar la seguridad de quienes los usen en el momento de una eventual intervención, tales como: Equipos para la detección de gases tóxicos, asfixiantes o explosivos, cuya presencia en túneles es más frecuente (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO+NO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y otros hidrocarburos), equipos para el control de la atmosfera subterránea, equipos para el control del ruido e iluminación, equipo para la obtención y análisis de partículas de polvo en suspensión en la atmosfera y aguas concentradas a lo largo de la excavación, equipo para labores de salvamento en atmósferas deficientes de oxígeno o contaminantes de gases tóxicos o asfixiantes, equipos de primeros auxilios disponibles en el puesto de socorro o dispensario de cada frente de trabajo y equipo para control y detección de tormentas eléctricas atmosféricas y otros equipos”.*

Artículo 35. Plan de ventilación. Disposiciones comunes a todas las labores subterráneas

- Toda labor minera subterránea debe tener un plan de ventilación en un término de seis (6) meses, contados a partir de la publicación del presente reglamento.
- Todas las labores mineras subterráneas accesibles al personal y los lugares donde se localice maquinaria, deben estar recorridas de manera permanente por un volumen suficiente de aire.
- El aire que se introduzca a la labor minera subterránea debe estar exento de gases, humos, vapores o polvos nocivos o inflamables.
- Compruebe que los lugares donde se realicen labores mineras subterráneas, estén ventilados de manera constante y suficiente, a fin de mantener una atmósfera limpia y respirable:

- El volumen de oxígeno en la atmósfera de la mina no debe ser inferior a 19,5%, o más del 23,5% en volumen de oxígeno.
- Los Valores Límites Permisibles (VLP) en la atmósfera de cualquier labor subterránea en Colombia para algunos gases contaminantes se muestran en la tabla 1.

VALOR LÍMITE PERMISIBLE (VPL): También conocidos como TLV - Threshold Limit Values, son valores de referencia para las concentraciones de agentes químicos en el aire y representan condiciones a las cuales se cree (basados en conocimientos actuales), que la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos día tras día durante toda su vida laboral, sin sufrir efectos adversos para su salud. En Colombia rigen los TLV establecidos por la ACGIH - Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales, conforme a lo establecido en el artículo 154 de la Resolución 2400 de 1979 del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social.

Otro Valor Límite Permisible es el Límite de Exposición de Corta Duración (STEL): Es la concentración a la que los trabajadores pueden estar expuestos de manera continua durante un corto periodo (15 minutos, no más de 4 veces por día y con un periodo de, por lo menos, 60 minutos entre exposiciones sucesivas a este valor), sin sufrir irritación, daños crónicos o irreversibles en los tejidos o narcosis en grados suficientes para aumentar las probabilidad de lesiones, accidentales, menoscabar la auto recuperación o reducir sustancialmente la eficacia en el trabajo y siempre que no se sobrepase el Valor Límite Permisible diario.

El Time Weighted Average (TWA) o Media Ponderada en el Tiempo, es el valor límite ambiental publicado por la ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists); se definen como la "concentración media ponderada en el tiempo, para una jornada laboral normal de trabajo de 8 horas y una semana laboral de 40 horas, a la que pueden estar expuestos casi todos los trabajadores repetidamente día tras día, sin efectos adversos".



**Tabla 1 Valores Límite Permisibles para algunos gases contaminantes en Colombia. Tomada de [11] pág. 43**

GASES	FÓRMULA	TLV –TWA (ppm)	TLV - STEL (ppm)
Dióxido de Carbono	CO <sub>2</sub>	5,000	30,000
Monóxido de Carbono	CO	25	
Ácido Sulfhídrico	H <sub>2</sub> S	1	5
Anhídrido Sulfuroso	SO <sub>2</sub>	-	0.25
Óxido Nítrico	NO	25	-
Dióxido de Nitrógeno	NO <sub>2</sub>	0.2	-

ppm: Partes por millón TLV: Valor límite permisible; TWA: concentración media ponderada en un tiempo de 8 horas y STEL: Límite de exposición de corta duración.

El Nivel Permissible de Exposición a monóxido de carbono de acuerdo con Occupational Safety and Health Administration OSHA es de 50 partes por millón (ppm), esto de acuerdo a la concentración media ponderada en un tiempo de 8 horas (TWA). Se estableció un límite superior de 200 ppm (nivel de exposición que nunca debe excederse sin importar las 8 horas de TWA), por el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional (NIOSH). El valor del Límite de los Higienistas Industriales de la Conferencia Americana Gubernamental (ACGIH) es de 25 ppm en un tiempo de 8 horas de TWA. Un nivel de 1200 ppm ha sido designado por NIOSH como de Inmediato Peligro para la Salud o la Vida (IDLH). La OSHA ha establecido una cantidad máxima de 20 ppm para el ácido sulfhídrico en el aire del trabajo, y un límite de 50 ppm durante un período máximo de 10 minutos si no ocurre exposición adicional. El NIOSH recomienda un límite de exposición máximo (REL) de 10 ppm durante un período de 10 minutos.

El artículo 40 del decreto establece la obligatoriedad para toda labor minera subterránea de tener un circuito de ventilación forzada, situación que favorece en gran medida el poder contar con una atmósfera minera controlada y adecuada para los trabajadores y para prevenir la acumulación de gases nocivos. En el caso del metano, su acumulación en algunos sectores de las minas o en labores específicas se presenta principalmente por emisiones fuertes y puntuales del gas que no se pueden diluir adecuadamente por el circuito de ventilación, debido a las deficientes condiciones de ventilación que no garantizan el caudal de aire suficiente para diluir el metano, por labores antiguas no selladas o mal selladas que aportan gas a la corriente de ventilación o por fallas en el suministro de energía que afectan la ventilación forzada durante la operación minera.

Artículo 42. Entrada y salida de aire. En toda labor minera subterránea, las instalaciones para entrada y salida de aire deben ser independientes, con una distancia no inferior a los cincuenta metros (50 m) y obedecer a un diseño del circuito de ventilación, de acuerdo con lo señalado en este Reglamento.

Artículo 46. Equipos de medición de gases. Todas las labores mineras subterráneas deben contar de forma permanente en sus instalaciones, con todos los equipos debidamente calibrados, que permitan la medición de gases, como Metano (porcentaje en volumen o porcentaje LEL), Oxígeno, Monóxido de Carbono, Ácido Sulfhídrico, Gases Nitrosos y Bióxido de Carbono. Dichos equipos de medición deben contar con la certificación de cumplimiento mínimo de norma Ex, la cual se refiere a que son a prueba de explosión tipo intrínsecamente seguro a una falla y de protección de ingreso (IP) 65 o mayor.

Parágrafo 3. Los resultados de las mediciones de los gases deben ser publicados en el interior de la mina en tableros de registro y control y especialmente a la entrada de una labor en desarrollo, preparación y explotación; igualmente, en el libro de registro de control de gases de la labor. Adicionalmente los resultados de dichas mediciones se deben divulgar a todos los trabajadores al inicio de cada turno

En el artículo 47 del decreto se establece para las minas subterráneas de carbón de Categoría III, el deber de implementar un sistema de monitoreo permanente y continuo de metano y oxígeno, en las vías principales de transporte y ventilación, otro aporte importante para permitir un control adecuado de la atmósfera minera.

El artículo 53 del decreto establece las concentraciones máximas permitidas de metano a partir de las cuales se deben suspender los trabajos mineros, se debe evacuar de manera inmediata el personal que esté laborando, y se debe diluir adecuadamente el metano a condiciones adecuadas (Ver tabla 2).

En general, respecto a concentraciones de metano permitidas al interior de las labores mineras se concluye que los contenidos de metano no deben superar el 1% en toda la mina, se exceptúan labores de retorno de aire de los tajos y retorno de los frentes de desarrollo y preparación, en las cuales se admiten concentraciones máximas de 1.5%. El aire de retorno de frentes con ventilación auxiliar en labores subterráneas de las Categorías II y III solo puede conducirse a frentes de desarrollo o explotación si no contiene más del 0.5% de metano.

**Tabla 2 Suspensión de labores por concentración máxima de metano en Colombia. Tomada de [11] pág. 47**

Sitio de la labor subterránea	Porcentaje (%) máximo permisible de Metano (CH <sub>4</sub> )	% LEL
En labores o frentes de explotación o avance	1	20
En los retornos principales de aire.	1	20
En el retorno de aire de los tajos.	1.5	30
En el retorno de aire de los frentes de preparación y desarrollo	1.5	30

LEL. (LOWER EXPLOSION LEVEL): Límite inferior de explosividad. Es la concentración mínima de gases, vapores o nieblas inflamables en aire, por debajo de la cual la mezcla no es explosiva. Es una propiedad inherente y específica para cada gas y material particulado, incluido el polvo de carbón, cada gas tiene su propio LEL. Al rebasar el LEL de un gas, las condiciones ideales para que se produzca una explosión están dadas y la explosión es inminente, sólo basta una chispa o que el gas alcance la temperatura de ignición. El LEL se mide con un explosímetro o monitor de gases de lectura directa con sensor. El límite inferior de inflamabilidad de un gas o vapor a temperaturas ambiente ordinarias expresado en por ciento de gas o vapor en el aire por volumen. Este límite se supone constante de hasta 1120°C. Por encima de esto debería ser reducido por un factor de 0,7, porque aumenta la explosividad con temperaturas más altas.

El artículo 58 del decreto establece la clasificación de labores mineras en tres categorías (ver tabla 3): Minas no grisutuosas cuando el contenido de metano en cualquier sitio de la mina es de 0%, minas débilmente grisutuosas cuando el contenido de metano en cualquier sitio de la mina no supere el 0.3% y minas fuertemente grisutuosas cuando la concentración de metano en cualquier sitio de la mina supere el 0.3%.

**Tabla 3 Clasificación de minas en Colombia o frentes de trabajo según contenidos de metano**  
**Modificada de [11] pág. 49**

CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN
I. Minas o frentes de trabajo no grisutuosos.	Son aquellas labores o excavaciones subterráneas para las cuales la concentración de metano en cualquier sitio de la mina es cero por ciento (0%).
II. Minas o frentes débilmente grisutuosos.	Son aquellas labores o excavaciones subterráneas para las cuales la concentración de metano en cualquier sitio de la mina sea igual o inferior a cero coma tres por ciento (0,3%).
III. Minas o frentes fuertemente grisutuosos.	Son aquellas labores o excavaciones subterráneas para las cuales la concentración de metano en cualquier sitio de la mina sea superior a cero coma tres por ciento (0,3%).

El artículo 62. Establece un plazo de tres años a partir de la expedición del decreto para realizar un estudio geológico en las minas subterráneas de carbón indicando en un plano las concentraciones de metano en los mantos de carbón a explotar, así como en los mantos superiores e inferiores.

Artículo 63. Análisis de riesgo. En las minas subterráneas de carbón se debe elaborar un análisis de riesgos para determinar e identificar las áreas propensas a desprendimientos instantáneos de gas metano. El análisis de riesgo y el plan de prevención deben estar contenidos dentro del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST.

Artículo 64. Contenido del análisis de riesgo. El análisis de riesgos debe contar, mínimo con la siguiente información:

- Los antecedentes de desprendimientos en explotaciones realizadas en la región;
- El tipo de carbón a explotar;
- Los tipos de desprendimientos posibles;
- Los planos geológicos estructurales (isopacas, fallas, deformaciones, entre otras);
- La distribución de los contenidos de gas metano en el manto de carbón, en m<sup>3</sup>/ton;
- Las estructuras geológicas en parte superior e inferior del manto a explotar;
- La profundidad del manto a explotar;
- La determinación del rumbo del fracturamiento principal del manto de carbón a explotar; y,
- Las estadísticas de las concentraciones de gas metano en el (los) manto(s) de carbón por m<sup>3</sup>/ton.

Artículo 65. Plan de prevención. Toda mina subterránea de carbón que de acuerdo con los resultados del análisis de riesgos sea susceptible de desprendimientos instantáneos de gas metano, debe contar con un plan de trabajo que le permita administrar las acciones para prevenir los posibles riesgos derivados de este evento y continuar con la explotación de los mantos de carbón. Este plan debe ser puesto a consideración de la autoridad minera, encargada del manejo de los recursos mineros, cuando se adelanten las visitas de seguimiento y control. Igualmente debe estar contenido dentro del Sistema de Gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo SG-SST. El plan debe incluir como mínimo:

- Las medidas de seguridad que se tomarán durante la explotación de los mantos de carbón reconocidos;
- La información de los factores de riesgo a los que estarán expuestos, la capacitación que todos los trabajadores de los frentes de trabajo deban recibir para controlarlos, la forma segura para realizar sus actividades, el tipo de herramientas y, en su caso, la maquinaria que deben utilizar; y,
- La metodología para definir o determinar las dimensiones de las barreras de protección que se deben conservar en las frentes de desarrollo, antes de continuar con su avance en las zonas susceptibles de desprendimientos instantáneos.

Artículo 66. Clasificación de minas por contenido de polvo de carbón. Una labor subterránea considerada dentro de la Categoría I del artículo 58 de este Reglamento, con respecto al metano, se clasifica como pulverulenta inflamable (polvo de carbón volátil muy fino), cuando el contenido de materias volátiles en el carbón que se explota, sea superior al dieciséis por ciento (16%), y una labor subterránea considerada dentro de las Categorías II y III respecto al metano (artículo 58), se clasifica como pulverulenta inflamable cuando el contenido de materias volátiles dentro del manto de carbón que se explota sea superior al catorce por ciento (14%).

Parágrafo 1. Para prevenir una explosión de polvo de carbón es necesario evitar que se presenten las siguientes condiciones de manera simultánea:

- Presencia de polvo de carbón
- Un tamaño de partículas que permita la propagación de la llama menor a 0,5 milímetros
- Una atmósfera con oxígeno suficiente para mantener la combustión
- Una nube de polvo con una concentración dentro del rango de explosividad
- Una fuente con energía suficiente para la ignición
- Que se supere el Límite Inferior de Explosividad

En resumen, el decreto No 1886 de 2015, por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas trata de subsanar falencias del anterior decreto No 1335 de 1987 respecto a temas de seguridad minera e involucra solidariamente al titular minero, el explotador minero y el empleador en la responsabilidad de la seguridad de las labores mineras subterráneas.

## 4. Explosiones Asociadas a Fallas Inversas en Minas Subterráneas de Carbón

Y. Cao et al. (2001), han estudiado durante muchos años, las características asociadas a las explosiones en algunos distritos mineros de carbón en China. Preocupados porque algunos autores mencionaban una estrecha relación entre las explosiones instantáneas en minas subterráneas de carbón con estructuras geológicas que son más propensas a acumular metano, se dieron a la tarea de ahondar en el tema. Autores anteriores a Cao y Sheperd, entre otros, estuvieron indagando sobre las explosiones de carbón y factores geológicos tales como el espesor de los mantos de carbón, la edad del manto, la profundidad de enterramiento actual y la distancia a plutones; con conclusiones diferentes para distintos campos de carbón y regiones, esto debido a la complejidad de los mecanismos causales.

Y. Cao et. al., (2001), hicieron un estudio en cuatro minas en China, ubicadas en dos provincias: Henan y Sichuan, y mencionan en su investigación: *“Las explosiones asociadas a mantos de carbón y relacionadas con fallas inversas, casi siempre se produjeron en el bloque piso”*.

Al respecto del enunciado anterior y su documentación, Y. Cao et al., (2001) resumen que, la primera observación importante de los fenómenos geológico-estructurales fue que los mantos de carbón en el bloque piso de las fallas inversas fueron sometidos a mayor deformación tectónica que los del bloque techo. El carbón perdió su carácter bandeado y se convirtió físicamente en formas alteradas microestructurales (carbón cataclástico, carbón granular y carbón milonítico), además afirman que casi siempre se produjeron explosiones dentro de una zona de carbón tectónicamente alterada que rodea este tipo de falla.

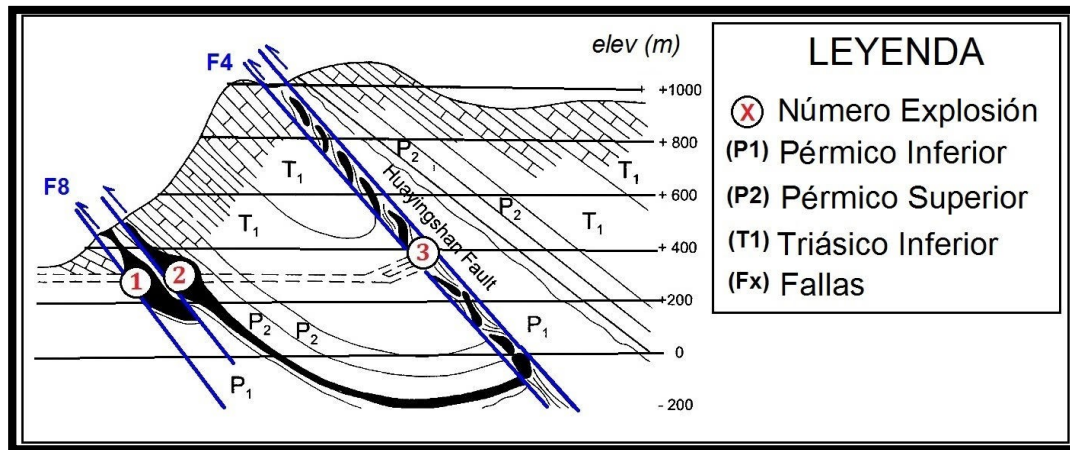
En segundo lugar mencionan que la zona de alteración tectónica relacionada con el bloque piso, se extiende más lejos de la falla que la del bloque techo.

En tercer lugar dicen que, las zonas de mayor contenido de metano en capas de carbón, cuando están presentes en asociación con fallas inversas, casi siempre están en el bloque piso. Estos tres factores son los principales controladores de las explosiones de gas en capas de carbón, asociados con fallas inversas.

Otros estudios en China, revelaron que las explosiones casi siempre ocurren en zonas intensamente deformadas de fallas con desplazamientos, inversas o normales, dentro de las cuales el carbón ha sido físicamente alterado microestructuralmente. Ocurrencias diferentes, están asociadas a fallas en planos de estratificación y pliegues de arrastre que pueden producir microestructuras de carbón en zonas más amplias. La presencia de microestructuras alteradas, se considera como el primer factor esencial para la ocurrencia de explosiones, y los distritos propensos a éstos, podrían predecirse mediante el estudio de la distribución espacial del carbón alterado y las estructuras geológicas (Peng, 1990; Cao, 1994 en Y. Cao et al., (2001). Lo anterior se ejemplifica con la figura 7, que documenta en una sección transversal lo ocurrido en la mina de carbón Tianfu en la Provincia de Sichuan. La explosión mostrada en el círculo No 1, movió 12.728 toneladas de carbón y roca. La explosión mostrada en el círculo No 2, desplazó 2.807 toneladas de carbón, y la explosión en el círculo No 3, 5.000 toneladas de carbón.



#### 4. Explosiones Asociadas a Fallas Inversas en Minas Subterráneas de Carbón



**Figura 7 Sección transversal geológica mostrando diferentes magnitudes de explosiones en la mina Tianfu-Provincia Sichuan (China). Modificado de [5]**

En los círculos se muestra la ubicación de las explosiones, el espesor de los mantos de carbón está exagerada en la sección. P1 = Formaciones del Pérmico inferior; P2 = Pérmico Superior; T1 = Triásico Inferior. F1 = falla 1, etc. La distancia horizontal no tiene escala.

Los factores que contribuyen a las explosiones donde se involucra carbón y gas en las minas subterráneas de carbón, son complejos y no se han entendido del todo. Lama y Bodziony (1998), enumeran siete factores principales considerados para tener en cuenta: estructura geológica, contenido de gas, permeabilidad del carbón, presión del gas, condición de esfuerzo-deformación, resistencia del carbón y propiedades de sorción/desorción del carbón.

La investigación de Y. Cao et al., (2001), evaluó la diferencia en la tendencia a las explosiones entre el bloque piso y el bloque techo de fallas inversas, relacionó las diferencias con las características del carbón y dan como conclusiones lo siguiente:

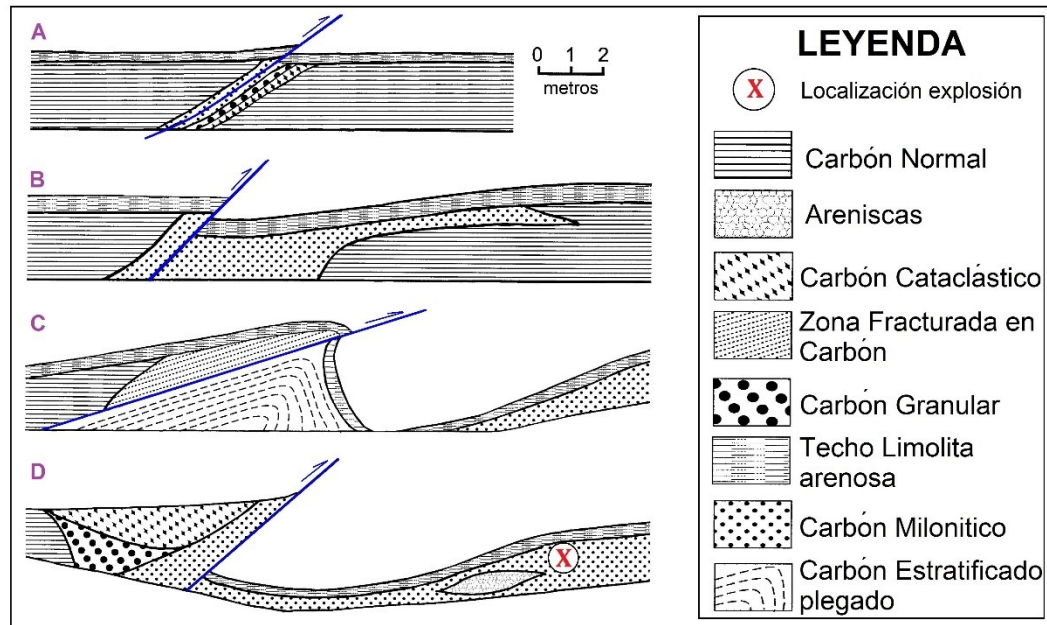
- Las explosiones estudiadas en la investigación siempre ocurrieron en zonas tectónicamente deformadas.
- En estas zonas, el cizallamiento había alterado la microestructura del carbón a un tamaño de grano extremadamente fino, volviéndolo blando y débil.
- En general, se puede esperar que las explosiones asociadas con fallas inversas ocurran con mayor frecuencia y con mayor magnitud en el bloque piso que en el bloque techo.
- El carbón microestructuralmente modificado (triturado), carbón propenso a explosiones, se desarrolló en mayor medida en el bloque piso de fallas inversas

que en el bloque techo.

- La prevalencia de explosiones en carbones alterados microestructuralmente se atribuye a su menor resistencia, tamaño de partícula más pequeño y mayor tasa de emisión de gases que los carbones normales.
- El contenido de gas del carbón y las emisiones a la atmósfera de una mina, varían entre los dos bloques de las fallas inversas estudiadas. Los altos contenidos de gas en el bloque piso de fallas inversas, se considera otro factor importante que contribuye a las explosiones.
- Las mediciones de esfuerzo-deformación se deben realizar en los dos bloques de fallas inversas para investigar cualquier relación con la aparición de explosiones.

En la figura 8, se ilustra en secciones transversales, varios casos en los que el carbón es propenso a explosiones. Estos perfiles se tomaron de la 6ta sección minera del caso de estudio de la mina No 12 del área de Administración de Carbón de Pingdingshan en China. Allí se hace referencia además a las condiciones de magnitud de algunas explosiones.

#### 4. Explosiones Asociadas a Fallas Inversas en Minas Subterráneas de Carbón



**Figura 8 Secciones estructurales mostrando distribución de dos bloques de una falla inversa con zonas propensas a explosiones. Modificado de [5]**

- (A) Falla inversa con desplazamiento de 0,4 m y un manto delgado de carbón propenso a la explosión que rodea el plano de falla.
- (B) Falla inversa con desplazamiento de 1m y carbón propenso a la explosión en el bloque piso, que coincide con un sinclinal de arrastre superficial.
- (C) Falla inversa con un desplazamiento de 5m y una zona propensa a explosión en el bloque piso que se extiende 30 m lateralmente desde la falla.
- (D) Falla inversa con un desplazamiento de 4,2 m y una zona propensa a explosión de 80 m en extensión lateral, ubicada en el bloque piso. La explosión, marcada con "x" desalojó 91 toneladas de carbón y mató a un minero.

Según la investigación anterior y otros casos estudiados de explosiones en minas subterráneas de carbón en Australia, Europa y América, se puede mencionar que dentro de los factores importantes a tener en cuenta a la hora de estudiar la relación de las explosiones con la geología estructural de una cuenca y, en particular de una mina, están los siguientes aspectos:

- Profundidad del manto
- Porcentaje de Materia Volátil (Rango del carbón)
- Tipo de falla y estructuras geológicas adicionales asociadas a los mantos de carbón
- Contenido de Gas ( $\text{pies}^3/\text{ton}$ ) o ( $\text{m}^3/\text{ton}$ )

- Composición maceral en porcentaje
- Contenido de cenizas

En la generación del gas metano interviene principalmente el rango del carbón que representa el proceso de madurez termal y el tipo de maceral. Al aumentar la temperatura y la presión, principalmente por procesos de enterramiento, cambia el rango del carbón, que se ve reflejado en la reflectancia del grupo maceral de la vitrinita ( $R_o$ ). La  $R_o$  mide la intensidad o porcentaje de luz reflejada sobre una superficie pulida del maceral vitrinita y es un indicador de rango o calidad del carbón y, por lo tanto, de la capacidad de éste para generar y almacenar metano.

Cada tipo de macerales o componentes orgánicos que hacen parte de la masa del carbón almacenan o adsorben diferentes volúmenes de gas, por lo que el análisis de macerales también es un potencial indicador del contenido de gas metano. En la mayoría de los estudios hasta ahora adelantados se ha encontrado que el maceral vitrinita es el más favorable para la acumulación del metano; sin embargo, en algunas cuencas la liptinita muestra una relación más directa con el contenido de gas.

## 5. Esquema de Evaluación y Control de Metano en Minería Subterránea de Carbón

Antes de plantear un esquema de evaluación y control, se abordarán algunas definiciones necesarias para el diseño de la metodología

### 5.1 Indicadores Compuestos

Un indicador compuesto es una representación simplificada que busca resumir un concepto multidimensional en un índice simple (unidimensional) con base en un modelo conceptual subyacente. Puede ser de carácter cuantitativo o cualitativo según los requerimientos del análisis. En términos técnicos, un indicador se define como una función de una o más variables, que conjuntamente “miden” una característica o atributo de los individuos en estudio (Schuschny, A., 2009)

Lo que a este trabajo se refiere, un indicador es aquel que se construye como función de dos o más variables, en cuyo caso se están midiendo características multidimensionales (p.e. porcentaje de material volátil en el carbón de un frente de mina, tipo de estructuras geológicas, etc.).

La construcción de un indicador compuesto requiere de dos condiciones básicas, a saber:

- 1) La definición clara del atributo que se desea medir y,
- 2) La existencia de información confiable para poder realizar la medición. Estas condiciones son indispensables para poder plantearse la posibilidad de construir un indicador compuesto, la satisfacción de la primera condición dará al indicador compuesto un sustento conceptual, mientras que la segunda le otorgará validez. Ambas condiciones se deben validar antes de considerar los aspectos metodológicos de la construcción del esquema de evaluación.

Un requerimiento adicional para la construcción de un indicador compuesto es la definición de un objetivo claro por el cual se está creando. En la mayoría de los casos, los indicadores se construyen con el objetivo de medir el desempeño de una unidad de análisis en un área o tema determinado, lo que se puede utilizar como punto de partida para el estudio de la situación de la misma, ya que proporciona información acerca de una cuestión de relevancia y permite percibir una tendencia o fenómeno no directamente detectable. La característica más relevante que se le puede atribuir a los indicadores es la de resumir en un valor, numerosos aspectos que pueden estar interrelacionados. Cuando se pretende utilizar indicadores, se deben tener presentes las ventajas y desventajas o aspectos limitantes con los que se puede llegar a topar un análisis, buscando siempre reducir esos limitantes por medio de una construcción metodológicamente adecuada.

- **Ventajas**

Cuando se quiere integrar un amplio conjunto de puntos de vista o subsistemas de una unidad de análisis considerada, los indicadores permiten reducir la complejidad de la información que deviene de las múltiples perspectivas que, de otra forma, pudieran percibirse en mutuo conflicto. La construcción de un indicador compuesto a menudo supone una implementación por fases partiendo del cálculo de indicadores referidos a subsistemas que intervienen.

El uso de indicadores, integran y resumen diferentes dimensiones de un tema, por eso permiten disponer de una *imagen de contexto* y son fáciles de interpretar por su capacidad de síntesis al reducir el tamaño de la lista de indicadores a tratar en el análisis; por otro lado, atraen el interés público por su capacidad de facilitar una comparabilidad entre unidades de análisis y su evolución. Esto es particularmente importante puesto que facilita la evaluación de la eficacia de las políticas y la rendición de cuentas por parte de los representantes de las minas y a su vez del gobierno.

- **Desventajas y/o limitaciones**

El uso de indicadores compuestos de cualquier tipo no está exento de limitaciones y desventajas generales, ya que puede proveer mensajes confusos si los indicadores están mal contruidos. Esto precisa que durante su proceso de construcción se realicen análisis de sensibilidad y robustez, ya que reducir la complejidad de un tema en un valor que,

supuestamente, lo mide “todo”, puede dar lugar a sesgos de percepción o a la simplificación excesiva.

La alternativa más viable al momento de diseñar indicadores en esquemas de evaluación y control, puede ser considerar el cálculo de sub-indicadores que representen el comportamiento de los distintos subsistemas que componen la representación que se desea estudiar. Es justamente ahí, donde comienzan a aparecer las complicaciones ya que la agregación ponderada de múltiples contenidos de información estadística puede acarrear crecientes niveles de incertidumbre asociados a la integración de las diversas escalas y dimensiones que el indicador compuesto intenta sintetizar.

El diseño del esquema de evaluación y control, debe contar con indicadores que sean capaces de obtener información veraz a partir de un conjunto de información “medible”, p.e. que los datos con que se alimentan estén ampliamente disponibles y sus frecuencias de muestreo respondan a un calendario “razonable” en relación a los objetivos que se plantean al momento de diseñar el indicador y que las unidades de análisis hayan quedado de acuerdo a un nivel tolerable de armonización sobre las estadísticas e indicadores a utilizar.

Toda iniciativa que busque diseñar un esquema de evaluación y monitoreo, debe estar orientada por una demanda potencial puesta de manifiesto por los actores sociales que pudieran estar involucrados en el área bajo análisis. Es por ello que durante el proceso de construcción de un esquema de evaluación y control, la interacción con pares y expertos es esencial para lograr la mutua aceptación de los indicadores, los cuales se deben concebir como una herramienta útil de investigación y comparación sobre la base del consenso. No obstante, a pesar de que se basan en el juicio experto, la elección del indicador requiere la aplicación minuciosa de principios estadísticamente fundamentados y procedimientos cuantitativos transparentes ya que, por ejemplo, puede haber conflicto con las escalas de medición y análisis: lo que es pertinente a nivel local, puede no serlo a nivel nacional.

### **5.1.1 Medición de indicadores compuestos en la sostenibilidad**

Resulta obvio afirmar que la información a ser utilizada para evaluar los avances o retrocesos hacia la sostenibilidad del desarrollo de los países no es perfecta, debido entre otros argumentos, a las características del propio concepto que cuestiona la medición perfecta o completa y que ha sido la base del desarrollo científico clásico (ciencia normal).

Así mismo, existen dificultades dadas por la deficiente calidad de información (que se ha presentado en numerosas ocasiones), y que en el ámbito de las ciencias sociales y ambientales imposibilitan la medición precisa de conceptos, a veces ambiguos o sometidos a la subjetividad del analista, como puede ser el de desarrollo.

Más formalmente, si un indicador compuesto se utiliza para tomar decisiones informadas, se deben diferenciar dos aspectos importantes: (i) El riesgo y (ii) La incertidumbre. El primero se refiere a un contexto en el que las distribuciones de probabilidad de los posibles eventos son conocidas. De esta forma es posible maximizar el valor esperado conociendo el conjunto factible de “estados de la naturaleza”. Por otro lado está la incertidumbre, en un sentido agudo, alude a sucesos cuya distribución no existe o no es definible ante la falta de criterios de clasificación confiables. En este caso, no sólo se desconoce el abanico de posibles situaciones y sus probabilidades, sino que dichos eventos pueden derivar en un sendero de carácter irreversible, dado el nivel de complejidad inherente.

En modelos tradicionales como el que se presenta en este capítulo, se supone que las variables son precisas, pero en la gestión de la sostenibilidad, cuando llega el momento de tomar decisiones, la imprecisión se manifiesta en la gran mayoría de las representaciones de la realidad bajo consideración, lo que da lugar a una variada gama de posibles interpretaciones.



## 5.2 Esquema de Evaluación

La evaluación como verificación frente a resultados esperados, es una de las definiciones que llevan al planteamiento de la metodología de este estudio. En otras palabras, es la medición del impacto que un plan, programa o proyecto adelantado ha tenido sobre las condiciones iniciales que motivaron su formulación y desarrollo.

El Banco Interamericano de Desarrollo - BID, establece: *“El monitoreo (control), es una herramienta de gestión empleada para comprobar la efectividad y eficiencia de un proceso, mediante la identificación de los aspectos limitantes y/o ventajosos que culmina recomendando medidas correctivas para optimizar los resultados deseados”*.

Los indicadores que resumen la información contenida en los sistemas de valoración, han ganado un creciente interés como una herramienta eficaz que contribuye a la formulación y el análisis de reglamentos y trabajos técnicos, así como a su evaluación y comunicación. Por su capacidad de síntesis, permiten atraer la atención de grupos específicos de personas (por ejemplo titulares mineros, directivas de las empresas operadoras mineras, organizaciones gubernamentales evaluadoras, trabajadores), dando lugar a la creación de explicaciones convincentes y ayudando a enfocar debates de políticas integrales que promueven el desarrollo orientado a la sostenibilidad.

Hay una clasificación de indicadores consultados (Schuschny, 2009), que es pertinente presentar para entender algunos de los escogidos para este trabajo: Los indicadores basados en las ciencias naturales, que suministran información directamente por mediciones físicas sobre los distintos medios o sustratos naturales, con el fin de determinar un indicador que defina una característica o atributo común, se incluyen en esta categoría los índices que miden las emisiones de gases. Por otra parte, existen indicadores de desempeño de políticas, que están vinculados a concretar estándares regulatorios, como por ejemplo los basados en el establecimiento de límites a las emisiones o descarga de compuestos o a la determinación de objetivos de políticas integrales que requieren la combinación de diversas variables.

Teniendo en cuenta que a lo largo de la historia de la minería subterránea de carbón en Colombia, se han tenido numerosos accidentes con consecuencias fatales y las situaciones más graves se han presentado debido a explosiones por gases, las

condiciones para mejorar, parten de una evaluación que demuestre conocimientos amplios de las cuencas carboníferas en cuanto a aspectos geológico-estructurales, pues es de esta información donde se puede obtener una fiabilidad mayor acerca de las características del carbón y sus gases. En el capítulo 4 de este documento, se habló de la importancia del estudio de las acumulaciones de metano en el bloque piso de fallas inversas, es por eso que al incorporar un indicador con esta característica se le da un peso ponderado alto, debido a que éste aspecto combinado con la aplicación de la normativa legal de seguridad y salud en el trabajo, puede hacer la diferencia para salvar vidas.

La revisión de mapas estructurales a medida que avanzan los frentes de explotación y las mediciones, por ejemplo de gases en las minas y/o las revisiones de los sistemas de ventilación, se deben hacer periódicamente para que los resultados obtenidos sean evaluados de manera constante y hacer las correcciones pertinentes en el menor tiempo posible.

Según lo explicado anteriormente, el propósito del avance de este trabajo, se concentró en indagar las posibilidades de adelantar una metodología sencilla y competente para evaluar indicadores de prevención de accidentes y control de acumulaciones de metano en la minería subterránea de carbón, esto para promover minas con entorno sostenible en su existencia como proyectos mineros.

La metodología que se propone, plantea algunos indicadores que están dentro de los más importantes del tema de estudio, aplicados en cuatro categorías o sistemas, esperando que se pueda desarrollar más adelante una tesis, empleando el diseño de todos los indicadores y la rigurosidad de la normativa y los componentes geológico-estructurales que compromete un proyecto minero en su totalidad. El peso ponderado de estos cuatro sistemas iniciales se muestra en la tabla 4 a manera de ejemplo.

**Tabla 4 Peso ponderado de cuatro temas o sistemas en el esquema de evaluación**

TEMA	PONDERACIÓN
Carbón	35%
Rasgos Geológicos y estructurales	35%
Metano	15%
Ventilación en la mina	15%

Se da una mayor ponderación a los sistemas carbón y rasgos geológico-estructurales, debido a que a través de una buena evaluación de estos, es posible tomar medidas ágiles y prevenir explosiones.

Además de lo anterior, se aplica la metodología semáforo que presenta tres categorías marcadas con colores verde, amarillo y rojo. El color verde revela que los indicadores evaluados cumplen las normas legales y/o condiciones geológicas según los rangos delimitados y no es necesario tomar correctivos en tiempo.

El color amarillo muestra que los indicadores evaluados tienen falencias de cumplimiento de los resultados esperados según los rangos definidos y se deben tomar acciones correctivas para mejorar las condiciones en un lapso que va entre quince días y máximo dos meses.

El color rojo revela que los indicadores evaluados tienen incumplimiento de los resultados esperados y que se deben suspender las labores en la mina inmediatamente, además tomar acciones para mejorar en un lapso que va de uno a quince días. Lo anterior se muestra simplificado en la tabla 5 a continuación.

**Tabla 5 Metodología semáforo con explicación simplificada**

COLOR	Tiempo máximo para tomar medidas
	N.A
	Entre 15 días y 2 meses
	Entre 1-15 días

En la tabla 6 se muestra un ejemplo de indicadores seleccionados y los rangos establecidos según la experiencia en la zona carbonífera del Suroeste de Antioquia

**Tabla 6 Indicadores de evaluación en cuatro temas y sus respectivos rangos**

TEMA	INDICADOR	RANGOS POR INDICADOR			OBSERVACIONES
Carbón	Material Volátil (%)	<15	15-30	>30	
	Profundidad del manto (m)	<200	200-400	>400	
Rasgos Geológicos y estructurales	Estructuras Geológicas asociadas al manto	Falla Normal	Falla Inversa Bloque Techo	Falla Inversa Bloque Piso	
		Sinclinal	Sinclinal de arrastre	Sinclinal de arrastre en bloque piso	
Metano	Porcentaje (%) máximo permisible Metano (CH <sub>4</sub> )	<1	1	>1	En labores, frentes de explotación o en retornos principales de aire.
	Porcentaje (%) máximo permisible Metano (CH <sub>4</sub> )	<1,5	1,5	>1,5	En retorno de aire de frentes de preparación y desarrollo o en retorno de aire de tajos
Ventilación en la mina	Entrada y salida de mina	Independientes y separadas >60m	Independientes y separadas <60m	La entrada y salida es la misma	
	O <sub>2</sub> atmósfera de mina en (%)	>19,5 y <23,5	19,5 o 23,5	<19,5 y > 23,5	

Ahora bien, a la hora de hacer la combinación de la evaluación ponderada más la metodología semáforo, se obtienen conclusiones que llevan a la toma de decisiones acerca de la prevención de accidentes y control del metano en minería subterránea.

### • Ejemplo ficticio para aplicar la metodología antes explicada

Se tiene el caso de la mina “La Sabrosa” ubicada en un distrito minero en Colombia, donde se han llevado a cabo estudios geológico-estructurales amplios. Se ha caracterizado el carbón de la mina en diferentes sitios y se han hecho mediciones del porcentaje máximo permisible de metano diariamente en: labores, frentes de explotación

## 5. Esquema de Evaluación y Control de Metano en Minería Subterránea de Carbón

y retornos principales de aire. Los datos del primer semestre del año 2018 resumidos para este ejercicio, se muestran en la tabla 7; en la tabla 8 se tiene la aplicación de la metodología semáforo a la Mina La Sabrosa y en la tabla 9 aparece la aplicación de metodología semáforo y la ponderación en la misma mina.

**Tabla 7 Datos resumidos de la mina “La Sabrosa”**

TEMA	INDICADOR	VALORES
Carbón	Material Volátil (%)	48,33
	Profundidad del manto (m)	500 m
Rasgos Geológicos y estructurales	Estructuras Geológicas asociadas al manto	Falla Inversa Bloque Piso
Metano	Porcentaje (%) máximo permisible Metano (CH <sub>4</sub> )	0%
Ventilación en la mina	Entrada y salida de mina	Independientes y separadas 45m
	O <sub>2</sub> atmósfera de mina en (%)	21%

**Tabla 8 Aplicación de Metodología Semáforo**

TEMA	INDICADOR	RANGOS POR TEMA
Carbón	Material Volátil (%)	>30
	Profundidad del manto (m)	>400
Rasgos Geológicos y estructurales	Estructuras Geológicas asociadas al manto	Falla Inversa Bloque Piso
Metano	Porcentaje (%) máximo permisible Metano (CH <sub>4</sub> )	<1
Ventilación en la mina	Entrada y salida de mina	Independientes y separadas <60m
	O <sub>2</sub> atmósfera de mina en (%)	>19.5 y <23.5

**Tabla 9 Aplicación de Metodología Semáforo y Ponderación en Mina “La Sabrosa”**

TEMA	INDICADOR	VALORES	PONDERACIÓN	CONCLUSIONES
Carbón	Material Volátil (%)	48,33	20%	Las labores se deben suspender inmediatamente
	Profundidad del manto (m)	500 m	15%	
Rasgos Geológicos y estructurales	Estructuras Geológicas asociadas al manto	Falla Inversa Bloque Piso	35%	Las labores se deben suspender inmediatamente
Metano	Porcentaje (%) máximo permisible Metano (CH <sub>4</sub> )	0	15%	Aunque estas mediciones dan cero, se debe tener en cuenta las mediciones de los ítems anteriores
Ventilación en la mina	Entrada y salida de mina	Independientes y separadas 45m	5%	Aunque la atmósfera de la mina cuenta con niveles permitidos de O <sub>2</sub> , la entrada y salida de la mina no es suficiente para las condiciones de los dos primeros temas
	O <sub>2</sub> atmósfera de mina en (%)	0.21	10%	

En el caso de la mina “La Sabrosa”, se deben tener en cuenta varios aspectos:

- El manto de carbón que se está trabajando, se encuentra a más de 400 metros de profundidad, lo cual pone en riesgo alto a los trabajadores. No obstante si las mediciones de porcentaje del material volátil en el carbón estuvieran en un rango más bajo, se podría tomar medidas preventivas sin suspender las labores, pero la combinación de ambas condiciones más las características geológicas de la presencia de una falla inversa, complican considerablemente la situación.
- En el avance de minado, además de las condiciones anteriores, se encuentran con una falla inversa y descubren que el bloque asociado a la falla es el bloque piso, con lo cual la situación se agrava aún más, pues según los estudios mostrados en el capítulo 4, esta estructura tiene una alta probabilidad de acumular metano y tener carbón modificado estructuralmente, lo que favorece las condiciones para una explosión.
- La mina “La Sabrosa” presenta entrada y salida independiente, sin embargo la distancia entre ambas es menor de 60 metros, lo cual es un riesgo en las circunstancias actuales encontradas.

- Aunque las mediciones realizadas detectan 0% de metano en túneles, labores y en retornos principales de aire, el nuevo frente de explotación presenta condiciones desfavorables que implican una explosión por intervención a un manto con posibles acumulaciones de metano en zonas estructuralmente críticas.

Teniendo en cuenta el análisis anterior, las labores en la mina “La Sabrosa” se deben suspender de inmediato y tomar medidas para prevenir accidentes. La ponderación combinada con la representación tipo semáforo se ilustran en la tabla 10 a manera de conclusión gráfica.

**Tabla 10 Conclusión gráfica en Mina “La Sabrosa”**

PONDERACIÓN	TOTAL
20%	70%
15%	
35%	
15%	20%
5%	
10%	10%

## **6. Conclusiones y Recomendaciones**

### **6.1 Conclusiones**

- Este trabajo, se concentró en indagar las posibilidades de adelantar una metodología sencilla y competente para evaluar indicadores de prevención de accidentes y control de acumulaciones de metano en la minería subterránea de carbón, esto para promover minas con entorno sostenible en su existencia como proyectos mineros.
- Teniendo en cuenta que a lo largo de la historia de la minería subterránea de carbón en Colombia, se han tenido numerosos accidentes con consecuencias fatales y las situaciones más graves se han presentado debido a explosiones por gases, las condiciones para mejorar, parten de una evaluación que demuestre conocimientos amplios de las cuencas carboníferas en cuanto a aspectos geológico-estructurales, pues esta información ofrece una fiabilidad mayor acerca de las características del carbón y sus gases.
- Se hace énfasis en la importancia del estudio de las acumulaciones de metano en el bloque piso de fallas inversas, asociadas a transformaciones estructurales de carbón y acumulación de metano que favorecen las explosiones.
- El conocimiento juicioso y detallado de condiciones técnicas de índole geológica necesarias para conocer una cuenca carbonífera revisten gran valor, ya que las características del carbón como espesor, profundidad, calidad, gases asociados y estructuras geológicas presentes, pueden determinar situaciones que se pueden prevenir.
- Se revisa y aplica en el Esquema de Evaluación de este trabajo, el marco legal que regula la seguridad en las labores de minería subterránea de carbón con presencia de metano en Colombia, decreto 1886 de 2015, el cual proporciona herramientas para establecer la influencia de este componente dentro de la sostenibilidad de un proyecto



seguro para sus trabajadores.

- La revisión de mapas estructurales a medida que avanzan los frentes de explotación y las mediciones, por ejemplo de gases en las minas y/o las revisiones de los sistemas de ventilación, se deben hacer periódicamente para que los resultados obtenidos sean evaluados de manera constante y hacer las correcciones pertinentes en el menor tiempo posible.
- Los indicadores que resumen la información contenida en los sistemas de valoración, han ganado un creciente interés como una herramienta eficaz que contribuye a la formulación y el análisis de reglamentos y trabajos técnicos, así como a su evaluación y comunicación.

### 6.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio que tenga como base un proyecto minero existente, puede ser en la zona carbonífera del Suroeste de Antioquia, ya que esta zona cuenta con características geológicas muy especiales, donde se puede verificar los componentes geológicos-estructurales haciendo énfasis en la identificación y clasificación de fallas inversas con sus respectivos bloque techo y bloque piso, y caracterizando acumulaciones de metano en éstas. Igualmente en este proyecto debe existir un PTO (Plan de Trabajos y Obras) y un documento que describa las acciones encaminadas a cumplir con la normatividad del Decreto 1886 del 21 de septiembre de 2015, para aplicar el esquema de evaluación con indicadores compuestos y relacionar varias variables en la evaluación del cumplimiento de políticas sostenibles, en aras de validar proyectos mineros responsables, con calidad y con buenas prácticas garantizadas.

## Referencias

1. Agencia Nacional de Hidrocarburos ANH. (2014). Ronda Colombia 2014 términos de referencia y aspectos técnicos. Bogotá. Recuperado de <http://www.controlz.com.co/rondacolombia2014/index.php/4-presentaciones>
2. Asociación del Metano para Mercados (M2M), [www.methanetomarkets.org](http://www.methanetomarkets.org)
3. Blandón, A. (1999). El Carbón y sus potencialidades de Uso. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Minas, 209 P.
4. Cao, Y.X., Dingdong, H., Glick, D., (2001). Coal and gas outbursts in footwalls of reverse faults. International Journal of Coal Geology 48, 47– 63
5. Cao, Y.X., (1994). Knowledge and practice for prediction of gas Y. Cao et al. / International Journal of Coal Geology 48 (2001) 47–63 61 outburst by gas-geology methods. J. China Coal Soc. 20, 75–78 (Suppl.) in Chinese with abstract in English.
6. Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa UNECE [www.unece.org/energy/se/cmm.html](http://www.unece.org/energy/se/cmm.html)
7. CONGRESO DE COLOMBIA, MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA (MINMINAS), Ley 685 de 2001, Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones. [www.congreso.gov.co](http://www.congreso.gov.co)
8. CONGRESO DE COLOMBIA, MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, Ley 1562 del 11 de julio de 2012, Por la cual se modifica el Sistema de Riesgos Laborales y se dictan otras disposiciones en materia de salud ocupacional.

## Referencias

---

9. Decreto No 1886 de 2015. Por el cual se establece el Reglamento de Seguridad en las Labores Mineras Subterráneas. MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA. 21 de septiembre de 2015.
10. Flores, R. (1998). Coalbed methane: From hazard to resource. . International Journal of Coal Geology 35, 3– 26. US Geological Survey, Denver, CO 80225, USA.
11. Global Methane Initiative. (2016). [https://www.globalmethane.org/documents/analysis\\_fs\\_spa.pdf](https://www.globalmethane.org/documents/analysis_fs_spa.pdf)
12. IEA. (2009). World Energy Outlook. Paris, France: International Energy Agency (IEA).
13. IPCC. (2007). Potencial de Calentamiento Global para un horizonte de 100 años. Cuarto Informe de Evaluación (AR4), p212. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>
14. Karacan, C. Özgen. Et al. (2011). Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction. Int. Journal of Coal Geology 35, pp. 121 - 156, Elsevier.
15. Lama, R.D., Bodziony, J., 1998. Management of outburst in underground coal mines. Int. J. Coal Geol. 35, 83–115.
16. Lunarzewski, L.W. (1998). Gas Emission Prediction and Recovery in Underground Coal Mines. Int. Journal of Coal Geology 35, pp. 117 - 145, Amsterdam: Elsevier.
17. Mariño, J.E. (2015). Gas Asociado al Carbón: Geología, contenidos, reservas, minería y posibilidades en Colombia. Tunja: Editorial UPTC Colección investigación, 196 P.
18. Ministerio de Minas y Energía. (2015). Decreto 1886 del 21 de septiembre de 2015: Reglamento de seguridad en las labores mineras subterráneas. [https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/DOCUMENTO\\_ReglamentoSeguridadMineriaSubterranea.pdf/774e58ab-d35d-4d92-8e7e-fd63ec127216](https://www.minminas.gov.co/documents/10180/698204/DOCUMENTO_ReglamentoSeguridadMineriaSubterranea.pdf/774e58ab-d35d-4d92-8e7e-fd63ec127216)

19. Moore, T. (2012). Coalbed methane: A review. *International Journal of Coal Geology* 101, pp. 36–81.
20. NACIONES UNIDAS. (2010). Guía de Mejores Prácticas para un Drenaje y Uso Eficaz del Metano en las Minas de Carbón. ECE Energy Serie N ° 31, pp 1-69
21. Shepherd, J., Rixon, L.K., Creasey, J.W. (1980). Analysis and prediction of geological structures associated with outbursts at Collinsville, Queensland. The Occurrence, Prediction and Control of Outbursts in Coal Mines Symposium, Australian Institute of Mining and Metallurgy, Parkville, Victoria, Australia, 159– 171
22. Shepherd, J., Rixon, L.K., Griffiths, L. (1981). Outbursts and geological structures in coal mines: a review. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 18, 267–283.
23. Schuschny, A., Soto, H. (2009). Guía metodológica: Diseño de indicadores compuestos de desarrollo sostenible. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). Santiago de Chile. 109 p.
24. Unidad de Planeación Minero Energética UPME (2016). Estrategias para el aprovechamiento el gas metano asociado a los mantos de carbón en explotaciones bajo tierra. Informe integrado. Contrato No 004-2016.  
[http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estrategias\\_para\\_el\\_aprovechamiento\\_del\\_Gas\\_Metano.pdf#search=gas%20metano%20asociado%20al%20carbon](http://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/EstudiosPublicaciones/Estrategias_para_el_aprovechamiento_del_Gas_Metano.pdf#search=gas%20metano%20asociado%20al%20carbon)
25. U.S.EPA & GMI (Global Methane Initiative. (2014). Status Legal y Regulatorio de la Propiedad del CMM en Países Clave: Consideraciones para los Decisores  
<https://www3.epa.gov/> <https://www.globalmethane.org/>